



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Kalkinpolton sivutuotteiden käyttäminen happoa tuottavien rikastushiekkojen kuivapeittomateriaalina

Juho Kinnunen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2019



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Kalkinpolton sivutuotteiden käyttäminen happoa tuottavien rikastushiekkojen kuivapeittomateriaalina

Juho Kinnunen

Ohjaaja(t): Johanna Holm, Anna-Kaisa Ronkanen, Kauko Kujala, Marja-Liisa Räisänen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2019

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Tutkinto-ohjelma (kandidaatintyö, diplomityö)		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma			
Tekijä		Työn ohjaaja yliopistolla	
Kinnunen Juhon		Ronkanen Anna-Kaisa	
Työn nimi			
Kalkinpolton sivutuotteiden käyttäminen happoa tuottavien rikastushiekkojen kuivapeittoon			
Opintosuunta	Työn laji	Aika	Sivumäärä
Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Diplomityö	Maaliskuu 2019	109, 5 liitettä
Tiivistelmä			
<p>Kaivosten ympäristövaikutuksista merkittävimpiä on happamien metallipitoisten vesien pääseminen luontoon. Näitä vesiä syntyy kaivoksen elinkaaren vaiheissa ja useista eri lähteistä. Aktiivisen toiminnan päättymisen jälkeen happaman valuman mahdollisia päälähteitä ovat rikastushiekka-altaat ja sivukivikat, joiden sulkeminen on ongelman ehkäisyn kannalta tärkeää. Monilla muilla teollisuuden aloilla syntyy sivuvirtoja, joilla ei välttämättä ole riittävää menekkiä ja ne saattaisivat soveltua sulkemisessa käytettäviin rakenteisiin. Tässä työssä selvitettiin kalkinpolton sivutuotteiden soveltuvuutta Pyhäsalmen kaivoksen happoa tuottavan rikastushiekan kuivapeitoksi. Työssä rakennettiin pilot-mittakaavan lysimetrikoe, jossa vertailtiin viittä eri peittorakennetta, joista neljä sisälsi kalkinpolton sivutuotteita. Lysimetrien kerrosten läpi suotautunutta vettä analysoitiin kenttämittauksin pH:n, redoxin, happipitoisuuden ja sähkönjohtavuuden osalta ja laboratoriossa niistä analysoitiin alkuainepitoisuuksia. Läpi suotautuneen veden määrää mitattiin koko kokeen ajan. Materiaaleille teetettiin myös vedenläpäisevyys-koe, parannettu Proctor-koe ja ABA-testi materiaalien soveltuvuuden arvioimiseksi.</p>			
<p>Työn tulosten perusteella rikastushiekalle ennen rikastushiekka-altaaseen pumppausta suoritettu kalkitus on riittänyt neutraloimaan valuman kokeen ajan, eikä peittämättömästäkään rikastushiekan läpi suotautuneen veden pH alittanut kuutta. ABA-testien perusteella neutralointikyky on kuitenkin pieni ja todennäköisesti loppuu jossain vaiheessa. Kalkkituotteita sisältävien peittojen läpi suotautuneen veden pH oli keskimäärin 0,7 yksikköä korkeampi verrattuna peittämättömään rikastushiekkaan ja 0,4 yksikköä verrattuna moreenipeittoon. Keskimääräisten liuenneiden aineiden konsentraatioiden perusteella kalkkituotteiden käytöstä on hyötyä raudan, mangaanin, sinkin, nikkelin ja kobolttin liukoisten pitoisuuksien vähentämisessä. Suotautuneiden vesimäärien avulla lasketut liuenneet kokonaismassat tukevat tätä, mutta erot esimerkiksi moreenipeittoon vaikuttivat pienenevän ajan edetessä. Poltetun kalkin käyttämisestä peitossa ei huomattu kokeen aikana hyötyä verrattuna pääosin kalsiittia sisältäviin peittoihin. Saturoituneen vedenjohtavuuden perusteella kalsiittipohjaisten kalkkituotteiden vedenjohtavuus on liian suuri, jotta ne yksistään täyttyisivät peittorakenteiden vaatimukset. Testattujen sivutuotteiden kemiallisten vaikutusten perusteella niitä voitaisiin harkita esimerkiksi monikerroksen osana tai suotaavissa rakenteissa. Lisätutkimuksia kuitenkin tarvitaan esimerkiksi geoteknisistä ominaisuuksista ja muun muassa kustannustarkastelu tulee tehdä kohdekohtaisesti.</p>			
<p>Tämän työn tuloksia voidaan käyttää happaman valuman ehkäisemiseen käytettyjen materiaalien valinnassa pohjatietona.</p>			
<p>Asiasanoja: AMD, ARD, Hapan valuma, kalkkituote, sivutuote, poltetu kalkki, kalsiitti, rikastushiekka,</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Degree Programme in Environmental Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Kinnunen Juho		Thesis Supervisor Ronkanen Anna-Kaisa	
Title of Thesis Side products of lime burning as dry cover of acid producing tailings			
Major Subject Water- and Geoengineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date March 2019	Number of Pages 109, 5 appendixes
Abstract <p>Acid mine drainage (AMD) (also referred as acid rock drainage (ARD)) is one of the most significant environmental impacts of mining. It is produced in several sources during different phases of mining, but after active mining the primary sources are tailings ponds and side rock piles. Closure of these structures is important way to mitigate impacts of AMD on surrounding environment or prevent formation of AMD. Side products possible suitable for closure structures, such as covers, could be utilized. In this thesis, side products of lime burning were studied for their suitability of dry cover of acid producing tailings of Pyhäsalmi metal mine. Pilot-scale lysimeter site was built to compare five different cover structures of which four contained lime burning side products. Water seeping through was analysed by field measurements for pH, redox, dissolved oxygen and electric conductivity and by laboratory tests for dissolved chemical elements. Amount of seepage water was monitored. Hydraulic conductivity was tested for materials and improved Proctor test and ABA-test were conducted for estimation of material suitability.</p> <p>Based on the result of thesis, liming of tailings before pumping to tailings pond was able to neutralize seeping water throughout the experiment. Even the pH of seepage water through uncovered tailings stayed above 6 during the experiment. However, based on the ABA-test, neutralizing capacity was small and will run out in some point. Cover structures including lime products kept the pH of seepage water averagely 0,7 units higher in contrast to uncovered tailings and 0,4 units higher in contrast to till cover. Based on the average element concentrations, using lime products in cover structure decreased concentrations of iron, manganese, zinc, nickel and cobalt. This is supported by the calculations of total dissolved masses through the test, but the difference to till cover was observed to decrease over time. Using products with burned lime did not show any significant benefit over products mainly of calcite. Based on saturated hydraulic conductivity results, hydraulic conductivity of calcite-based covers was too high for only cover structure. However, materials could be suitable to be used as a part of multi-layered cover or structures that are designed to allow some sort of seepage. Additional research is needed for example about the geotechnical suitability of the materials and cost should be estimated for every utilization site separately.</p> <p>The results of this thesis can be used as a base knowledge when considering usage of lime-based materials in prevention of AMD</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty SMA Mineral Oy:lle. SMA:n lisäksi tätä työtä on rahoittanut TEKES eli nykyisin Business Finland. Projekti alkoi maaliskuussa 2017 ja kesti helmikuuhun 2019. Työn ohjaajina toimivat SMA Mineral Oy:n ympäristö- ja laatupäällikkö Johanna Holm, työn alkuvaiheissa yliopisto-opettaja Anne Tuomela, myöhemmin dosentti Anna-Kaisa Ronkanen ja TkT Kauko Kujala sekä asiantuntijaohjaajana FT Marja-Liisa Räisänen. Haluan kiittää projektissa mukana olleita ohjauksesta ja kommentteista työn aikana. Kiitokset Pyhäsalmen kaivoksen ympäristöpäällikölle Maria Hänniselle rikastushiekan tarjoamisesta koemateriaaliksi.

Lisäksi erityiskiitokset vaimolleni Sonjalle.

Oulussa, 19.3.2019

Juho Kinnunen

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	7
2 Kaivosvostoiminta ja kaivosten elinkaari	9
3 Hapon valuma kaivosalueilla	13
3.1 Hapon muodostukseen vaikuttavat tekijät	15
3.2 Hapon ja veden kulkeutuminen rikastushiekkapatjaan	18
3.3 Peittorakenteiden käyttö happaman valuman estämiseen rikastushiekka-altaista	20
4 Materiaalit ja menetelmät.....	26
4.1 Tutkittavat materiaalit	29
4.2 Koerakenteet	33
4.3 Lysimetrien reunuksien vaikutus kerätyn veden määrään	38
4.4 Lysimetrien rakentaminen.....	40
4.5 Tutkimusmenetelmät.....	45
4.5.1 Kenttämittaukset	46
4.5.2 Laboratoriokokeet.....	48
5 Tulokset ja niiden tarkastelu	52
5.1 Materiaaleille teetettyjen testien tulokset.....	52
5.2 Lysimetrien vedenläpäisevyys ja kerätyn veden määrä	54
5.3 Lysimetrien rakenteiden läpi suotautuneiden vesien ominaisuudet.....	59
5.3.1 Suotoveden liukoisten aineiden pitoisuudet	66
5.3.2 Suotoveden liukoisten aineiden pitoisuudet verrattuna muun muassa talous- veden laatuvaatimukseen	69
5.3.3 Lysimetrien alkuaainepitoisuudet verrattuna Pyhäjärven luonnontaustaan ja Pyhäsalmen kaivoksen jätevesiin	75
5.3.4 Liuenneiden aineiden kokonaismäärät	76
5.3.5 Pohdintaa erojen syistä ja mekanismeista	80

5.4 Taloudellinen tarkastelu	85
6 Pohdinta	90
7 Johtopäätökset.....	96
8 Yhteenveto	97
Lähdeluettelo.....	100

LIITTEET:

Liite 1: Laboratorioanalyysien menetelmät, mittausepävarmuudet, määritysrajat ja yksiköt

Liite 2: Kenttämittausten tulokset

Liite 3: Laboratorioanalyysien tulokset jaoteltuna päivämäärän ja lysimetrin mukaan

Liite 4: Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset

Liite 5: Materiaaleille teetettyjen ABA-testien tulokset

MERKINNÄT JA LYHENTEET

L1RH	Lysimetri, jossa on pelkästään peittämätöntä rikastushiekka (1. lysimetri)
L2MO	Lysimetri, jossa 1m Moreenipeitto (2. lysimetri)
L3MI	Lysimetri, jossa 80cm Kalkmix Mild 0-5 mm peitto, 20cm moreenia kasvukerroksena (3. Lysimetri)
L4KA	Lysimetri, jossa 80 cm Kalsiittipeitto, 20cm moreenia kasvukerroksena (4. Lysimetri)
L5SE	Lysimetri, jossa seospeitto, 15 cm Kalkmix Normalia sekoitettuna 15 cm rikastushiekkaa, 20cm moreenia kasvukerroksena (5. lysimetri)
L6NO	Lysimetri, jossa 80cm Kalkmix Normal peitto, 20cm moreenia kasvukerroksena (6. lysimetri)
ORP	Hapetuspelkistyspotentiaali (Oxygen-Reduction Potential)
TDS	Liukoinen kiintoaine (Total Dissolved Solids)
TOC	Orgaaninen hiilen kokonaismäärä (Total Organic Carbon)
DOC	Liennut orgaaninen hiili (Dissolved Organic Carbon)
TIC	Epäorgaanisen hiilen kokonaismäärä (Total Inorganic Carbon)
ABA	Happo-emäs tasapainon arviointimenetelmä (Acid Base Accounting)
YVA	Ympäristövaikutusten arviointimenettely

1 JOHDANTO

Kaivostoiminnasta syntyy puhdistusta vaativia vesiä toiminnan aikana, mutta usein myös toiminnan jälkeen. Esimerkiksi rikastushiekka-altaat saattavat vielä pitkäänkin varsinaisen kaivostoiminnan loputtua tuottaa happamia metallipitoisia vesiä, mikäli niitä ei ole suljettu asianmukaisesti. Eräs sulkemistapa on rikastushiekka-altaan peittäminen siten, että hapen ja veden kulkeutuminen estetään tai se vähenee huomattavasti. Hapen kulkeutumisen vähentäminen hidastaa hapontuottoa ja vähentää siten yleensä myös liuenneiden metallien pitoisuuksia rakenteiden läpi suotautuvissa vesissä. Hyvästä peittorakenteesta huolimatta vedet saattavat silti kaivata lisäkäsittelyä. Usein kaivosyhtiöillä on vaihtoehtona valita yksinkertaisemmat ja kustannuksiltaan edullisemmat peittorakenteet ja painottaa muita veden käsittely keinoja saavuttaakseen ympäristöluvissa esitetyt kriteerit valumavesille.

Suomessa on useita kaivoksia, joissa sulkeminen on pian ajankohtaista, niinpä tutkimustietoa mahdollisista sulkemisen materiaaleista tarvitaan. Kaivosteollisuuden mittakaava on usein suurta ja siten sekä materiaalikustannukset, että sulkemisenkin ympäristövaikutukset ovat merkittäviä. Kustannuksia on mahdollista pienentää sopivia jäte- ja sivutuotevirtoja hyödyntämällä. Lisäksi käyttämällä kierrätysmateriaaleja voidaan vähentää neitseellisten materiaalien käyttöä vähentäen siten mahdollisesti myös kokonaisympäristövaikutusta. Kierrätysmateriaaleilla saattaa olla myös hyödyllisiä ominaisuuksia, joita hyödyntämällä peittorakenteen toimivuutta voidaan parantaa.

Sivuvirtojen, esimerkiksi polttolaitosten tuhkien ja metalliteollisuuden kuonien käyttöä peittomateriaaleina on tutkittu. Usein kuitenkin ongelmana on sivutuotteista liukenevat aineet, jotka estävät sivutuotepeittojen ympäristökelpoisuuden. Tässä työssä tutkittiin SMA Mineral Oy:n poltetun kalkin tuotannossa syntyvien sivutuotteiden käyttöä Pyhäsalmen sinkki- ja kuparikaivoksen happoa tuottavan rikastushiekan kuivapeittorakenteena pilot-mittakaavan kokein. Työssä tutkitut SMA Mineral Oy:n materiaalit on luokiteltu sivutuotteiksi ympäristöluvassa ja niille on tehty

kemikaalilainsäädännön mukainen tuotteistus. Maanrakennuksessa niitä voi käyttää ilmoitusmenettelyllä väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa MARA-asetuksen mukaisesti (VNA 843/2017). Muissa kohteissa niiden käyttö vaatii ympäristöluvan. Työn tavoitteena oli arvioida eri sivutuotteista rakennettujen peittojen soveltuvuutta kuivapeitoiksi. Arvioitavia kriteerejä oli vedenläpäisy ja läpäisevän veden laatu verrattuna peittämättömään tai pelkällä moreenilla peitettyyn rikastushiekkaan.

2 KAIVOSVOSTOIMINTA JA KAIVOSTEN ELINKAARI

Kehittyvien maiden nopea talouskasvu nosti 2000-luvun alussa huomattavasti malmien ja metallien hintoja lisäten kaivostoimintaa ja siihen investointia myös Suomessa. Kaivostoiminta on lisäksi siirtynyt suurelta osin ulkomaiseen omistukseen. (Berg-Anderson ym. 2011, s. 36) Kaivostoimintaan liittyy maailmanlaajuisten trendien aiheuttamaa painetta: esimerkiksi väestönkasvu lisää tuotantopaineita samalla kun ilmastonmuutos lisää paineita energiatehokkuuteen ja vähäpäästöisyyteen. Lisäksi maailmanlaajuisesti muun muassa maankäyttö todennäköisesti tiukentuu ja vesivaroista on pula, mikä ohjaa kaivosteollisuutta maanalaisiin ja muuta kuin makeaa vettä hyödyntäviin prosesseihin. (Hakanpää & Lappalainen 2009, s.383)

Kaivosten elinkaari voidaan jakaa viiteen vaiheeseen: malminetsintään, taloudellisiin selvityksiin, kaivoksen avaamisvaiheeseen, toimintavaiheeseen, sulkemiseen ja jälkihoitoon. Kaivostoiminnan koko elinkaarta säätelee useita lakeja ja asetuksia sekä toimintaan ja erityisesti ympäristövaikutuksien hallintaan on olemassa lukuisia standardeja ja ohjeistuksia (Hakanpää & Lappalainen 2009, s.372) Ympäristövaikutusten arviointi eli YVA on lakisääteinen osa merkittävän kokoisen kaivoksen suunnitteluvaihetta (avolouhoksen ala yli 25 ha tai irrotettavan aineksen kokonaismäärä yli 550 000 t/a) (5.5.2017/252). Ehdot täyttyvät Suomessa olevissa kaivos Hankkeissa lähes poikkeuksetta ja ne kuuluvat siis YVA:n piiriin. Ympäristövaikutusten arviointi linkittyy myös vahvasti taloudellisiin selvityksiin.

Malminetsintä pyrkii osoittamaan taloudellisesti kannattavat mineraalivarannot. Malminetsinnässä voidaan hyödyntää jo olemassa olevia kartoituksia ja eri mittakaavoissa toteutettavia kenttätutkimuksia kuten kairauksia ja tutkimuskaivantoja. (Kauppila ym. 2011) Malminetsinnän mittakaava on tuotantoa huomattavasti pienempi, joten usein ympäristövaikutukset jäävät pienemmäksi kuin varsinaisessa kaivostoiminnassa. Kuitenkin toiminnasta voi aiheutua esimerkiksi pölyämistä ja vaikutuksia lähivesistöihin. (Heikkinen & Noras 2005).

Kaivoksen avaaminen vaatii edelleen malminetsinnän tulosten tarkentamista ja taloudellisen kannattavuuden arviointia koko toiminta huomioon ottaen (Heikkinen & Noras 2005). Tähän kuuluu olennaisesti myös ympäristövaikutusten arviointimenettely, jonka YVA-lain mukaan on tehtävä mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, kun vaihtoehtoja ei vielä ole lyöty lukkoon (5.5.2017/252/15 §). Kaivoksen sulkemisen kustannukset ja jälkihoidon kustannukset on myös tärkeä arvioida kokonaiskustannuksen osana (Hakanpää & Lappalainen 2009 s.377). Ennen tuotannon aloittamista on haettava kaivostoimintaan tarvittavat luvat. Tuotantovaiheen kesto vaihtelee esimerkiksi malmiesiintymän koon ja laadun sekä käytettyjen louhintamenetelmien mukaan. Tuotanto voi myös keskeytyä ja käynnistyä uudelleen useita kertoja taloudellisten syiden takia. (Heikkinen & Noras 2005) Toimintavaiheen ympäristövaikutuksia aiheuttavat esimerkiksi sivukiven ja rikastushiekan muodostuminen, pohjaveden pinnan aleneminen ja toiminnan tuottamat kuivatus- ja jätevedet (Hakanpää & Lappalainen 2009, s.374). Vettä käytetään kaivoksilla esimerkiksi rikastusprosesseissa ja pölynestossa. Lisäksi jätevesiä muodostuu louhosten kuivatuksesta ja sadevesien päästessä suotautumaan sivukivikasojen tai rikastushiekkavarastojen läpi. (Bernd Lottermoser 2010)

Perinteisesti kannattavasti hyödynnettävissä olevan malmin lähentyessä loppuaan on aloitettu kaivoksen alasajo. Sen aikana valmistellaan suunnitelmien mukaiset kaivoksen sulkeminen ja tulevat jälkihoitomenetelmät. Sulkemistoimenpiteisiin ja niiden vaatimuksiin vaikuttaa erityisesti sivukivien ja rikastushiekkojen haponmuodostuspotentiaali. (Heikkinen & Noras 2005) Nykyään pyritään siihen, että kaivoksen sulkeminen on toiminnan aikainen jatkuva prosessi, jossa mahdollisuuksien mukaisia sulkemistoimenpiteitä toteutetaan heti kun se on mahdollista. Kun kaivoksen toiminnot suunnitellaan sulkemistoimintoja ajatellen (engl. design for closure) sulkemisen toteuttaminen on helpompaa.

Toiminnan aikaisesta sulkemisesta johtuu, että kaivoksen elinkaaren aikana saattaa olla useita pienempiä peittorakennetarpeita, kun suljetaan esimerkiksi pienempiä kenttiä tai sivukivikasoja. Koska peittorakenteet ovat kovista vaatimuksista ja suurista

materiaalimääristä johtuen kalliita, helpottaa kustannusten jakautuminen useaan osaan niiden hallintaa.

Uusi kaivosten sivukiviä ja rikastushiekkojen parhaita käytäntöjä käsittelevä BAT-asiakirja on julkaistu joulukuussa 2018 ja se ohjaa arvioimaan ja päivittämään sulkemisen suunnitelmia ja toteuttamaan jo mahdollisia sulkutoimenpiteitä toiminnan aikana. Kaivosyhtiöt hyötyvät tästä ympäristövaikutusten kattamiseen asetettujen vakuuksien päivityksenä. (Jouttijärvi & Nieminen 2018) Ympäristövakuudet on aiemmin asetettu kaivoksen perustamisvaiheessa arvioitujen sulkemisen kustannusten perusteella turvaamaan sulkeminen, mikäli yhtiöllä ei ole siihen myöhemmin varaa. Ympäristövakuus on vapautettu, kun sulkemistoiminnot on hyväksytysti suoritettu. Uuden toimintatavan mukaisesti vakuutta on mahdollisuus pienentää, mikäli yhtiö toteuttaa sulkemistoimia ja osoittaa, että sulkemisen kokonaiskustannukset ovat pienentyneet. Tämä vapauttaa sitoutunutta pääomaa. Lisäksi sulkemistoimien toiminnan aikainen toteuttaminen antaa lisätietoa todellisista kustannuksista ja rakenteiden toimivuudesta niin kaivosyhtiölle kuin viranomaisellekin.

Kaivosten sulkemisen tavoitteena on, että kaivosalueesta ei aiheudu haittaa ympäristölle tai vaaraa terveydelle. Ympäristölle vaaraa aiheuttavat rikastushiekat ja sivukivikasat pyritään saattamaan stabiiliin tilaan minimoiden valvonnan tarpeen (EC 2009). Tästä saatetaan käyttää esimerkiksi nimitystä walk away conditions, eli vapaasti suomennettuna suljettu kaivos pärjää itseksensä. Taustalla on luultavasti ajatus siitä, että kun kuormittava tekijä saadaan poistettua, luonto korjautuu itsestään ajan kanssa.

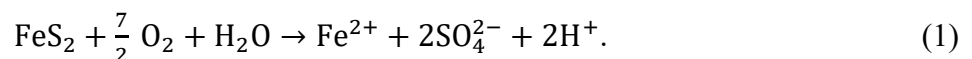
Kaivokset tuottavat toiminnan aikana erilaisia jätevesiä. Niitä ovat esimerkiksi prosessivedet, kuivatusvedet ja suotovedet eri rakenteista. Prosessivedet pyritään yleensä kierrättämään suurella kierrätysasteella. Kuivatusvedet saattavat vaatia puhdistamista, mikäli niihin on liennut esimerkiksi merkittäviä määriä räjähdettäviä tai metalleja. Suotovesiä saatetaan kerätä esimerkiksi ojarakenteilla puhdistusta varten. Toiminnan aikana käytössä on yleensä vedenpuhdistustekniikoita luontoon päästettävälle vedelle, mutta on mahdollista, että vesien käsittelyä joudutaan jatkamaan myös sulkemisen

jälkeen. Veden käsittelymenetelmät voidaan jaotella aktiivisiin ja passiivisiin. Passiivisia menetelmiä ovat esimerkiksi erilaiset kalkkikivestä rakennetut kanavat ja padot, ja pääosin biologisiin prosesseihin perustuvat kosteikot ja suot (Skousen *ym.* 2017). Passiivisia menetelmiä enemmän jatkuvaa huolehtimista kaipaavat aktiiviset menetelmät, esimerkiksi, ionin vaihto, sammutetun kalkin lisäys, hapetus ja ilmastus tai käänteisosmoosi. Aktiiviset menetelmät ovat tehokkaita haitta-aineiden poistossa ja niitä käytetäänkin vaativissa kohteissa. (Gaikwad 2010, Skousen *ym.* 2017) Aktiivisten menetelmien käyttö on helpommin toteutettavissa kaivoksen toiminnan aikana, sillä se vaatii energiaa ja usein tarkempaa valvontaa ollen siten myös kalliimpaa. Suljettujen kaivosten vesienkäsittelyssä pyritään tästä syystä hyödyntämään passiivisia menetelmiä, mikäli mahdollista.

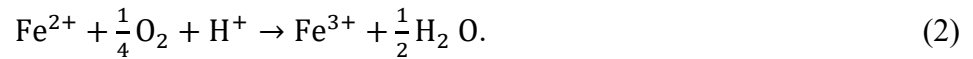
3 HAPAN VALUMA KAIVOSALUEILLA

Sulfidisten malmien, kuten kullan, kuparin ja nikkelin rikastamiseen liittyvä toiminta tuottaa happamia valumisvesiä (engl. Acid Mine Drainage eli AMD). Hapan valuma syntyy yleensä kaivannaisjätealueella sulfidimineraalien hapettumisen seurauksena. Happamien valumisvesien muodostuminen saattaa olla alueella myös luonnollinen ilmiö (sulfidipitoiset kalliopaljastumat), mutta kaivostoiminnan myötä kallion sulfideja paljastuu hapelle esimerkiksi louhosseinämissä ja maan päälle sijoitetulla kaivannaisjätealueilla. AMD:n primäärilähteiksi luetaan sivukivikasat, rikastushiekka-altaat, kaivosrakenteet ja kuivatusvedet. Sekundäärisiä lähteitä ovat esimerkiksi varastokasat ja teiden varsille varissut rikaste. (Akcil & Koldas 2006) Kaivosten sulkemisessa erityistä huomiota vaativat rikastushiekka-altaat ja sivukivikasat, jotka saattavat tuottaa pitkään suuria määriä hapanta valumaa altistuessaan hapelle ja sadevedelle.

Sulfidimineraalien altistuminen vedelle ja hapettimelle käynnistää hapetusreaktion, sillä ne ovat muodostuneet, kun maapallolla on vallinnut pelkistävät olosuhteet ilman happea. (Kauppila ym. 2011) Sulfidimineraalit ovat siis epävakaita ja reagoivat helposti altistettaessa maanpinnan happirikkaille olosuhteille (Hogan & Tremblay 2001). Pyriitti, FeS_2 , on yleisimpiä sulfidimineraaleja ja sen hapettumisreaktiota käytetään kuvaamaan yleisesti happamien valumisvesien muodostumisreaktioita (Akcil & Koldas 2006). Myös useilla Suomen kaivoksilla, kuten Pyhäsalmen kuparia ja sinkkiä louhivalla kaivoksella rikastushiekasta iso osa on pyriittiä (Heikkinen & Toropainen 2006). Pyriitti reagoi hapen ja veden kanssa ja muuttuu liuenneeksi raudaksi, sulfaatiksi ja vetyioneiksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti (Akcil & Koldas 2006):



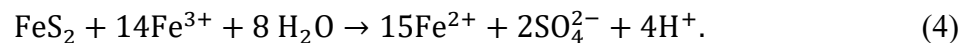
Tämä laskee neutraloivien komponenttien puuttuessa veden pH:ta. Mikäli happipitoisuus, pH ja bakteerikannat suosivat hapettumista, ferrirauta hapettuu edelleen kolmiarvoiseksi ferriraudaksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti (Akcil & Koldas 2006):



Mikäli pH on välillä 2,3-3,5 ferrirauta saostuu kiinteäksi ferrihydroksidiksi seuraavasti (Akcil & Koldas 2006):



Tämä laskee edelleen pH:ta. Mikäli ferrirauta ei reagoi yhtälön 3 mukaisesti se voi reagoida liuoksessa seuraavasti (Akcil & Koldas 2006):



Nordstromin ja Alpersin mukaan (1999b) liuennut ferrirauta on voimakas hapetin ja tuottaa sulfidien kanssa reagoidessaan huomattavasti enemmän happoa, kuin happi. Tämä on nähtävissä myös reaktioyhtälöistä 3 ja 4 verrattuna yhtälöihin 1 ja 2. Lisäksi ferriraudan toimiessa hapettajana reaktiot tapahtuvat nopeammin (Plumlee 1999b). Ferriraudan liukoisuus on kuitenkin pieni lähellä neutraalia pH:ta ja siten happea pidetään reaktionopeuden määräävänä, kunnes pH laskee neljään. Silloinkin happea tarvitaan reaktioyhtälön 2 mukaiseen reaktioon ferriraudan määrän ylläpitämiseksi, mutta hapen ei tarvitse kulkeutua mineraalin pinnalle asti. (Nordstrom & Alpers 1999b)

Hapan valuma on tyypillisesti pH:ltaan matalaa ja sisältää kohonneita pitoisuuksia muun muassa rautaa, sulfaatteja ja erilaisia raskasmetalleja riippuen kaivoksen malmista (Sheoran & Sheoran 2006). Esimerkiksi Pyhäsalmen kaivoksella on vuonna 2006 mitattu rikastushiekka-altaan suotovesistä 10-100 kertaisia pitoisuuksia muun muassa raudasta, mangaanista, sinkistä kuparista ja nikkelistä verrattuna luonnon taustapitoisuuksiin (Räisänen & Skinnari 2015). Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että metallien liukoisuus yleensä kasvaa pH:n laskiessa neutraalista ja tai veden hapetus-pelkistyspotentiaalin

ollessa negatiivinen. Käyttäytyminen kuitenkin riippuu suuresti metalliyhdisteestä ja useita poikkeuksiakin on. (Weiner 2012, s. 185)

Jokiympäristössä päätekijöitä happaman valuman ympäristövaikutuksissa ovat happamuus, suolaisuus, metallien myrkyllisyys ja vaikutukset sedimentaation. Yhdessä nämä aiheuttavat muutoksia ravintoketjuun ja pienentävät biodiversiteettiä. (Gray 1997) Pääosin samat vaikutukset koskevat myös järviä. Happamuus on eliöille haitallista, koska usein ne ovat sopeutuneet tietylle pH-alueella ja sen muuttuminen voi vaikuttaa esimerkiksi lisääntymiseen tai ravintoketjuun. Suolaisuus saattaa veden tiheyden muuttuessa aiheuttaa häiriöitä järvissä esimerkiksi Suomessa tyypilliseen kevät- ja syyskiertoon, jossa veden lämpötilan ollessa kaikkialla lähes sama sekoittuminen ja siten hapen kulkeutuminen on tehokasta. Kerrostunut suolainen vesi ei välttämättä sekoitu ja saattaa aiheuttaa erityisesti syvänteissä happikatoa. Sedimentaatio saattaa puolestaan lisääntyä esimerkiksi raudan saostuessa. Lisäksi sedimentteihin voi sitoutua myrkyllisiä metalleja ja hapen valuma saattaa muuttaa pieneliöiden käyttämien aineiden olomuotoja sedimentissä (Gray 1997).

Korkeat metallipitoisuudet tai tietyt metallien hapetusasteet ovat haitallisia eliöille (Weiner 2012). Esimerkiksi kolmen arvoista kromia pidetään suhteellisen haitattomana ja kuuden arvoinen kromi on puolestaan erittäin myrkyllistä. Raskasmetallit sitoutuvat usein helposti hapen, typen tai rikin, eliöille yleisten aineiden kanssa. Useimmat raskasmetallit ovatkin tarpeellisia pienissä määrin ja osallistuvat esimerkiksi proteiinien osana tärkeisiin reaktioihin kuten fotosynteesiin, hapen kuljetukseen tai ravinnon hapettumiseen. Haitallisia vaikutuksia ne aiheuttavat esimerkiksi estäen proteiinien oikeaa toimintaa. (Selinus 2003)

3.1 Hapon muodostukseen vaikuttavat tekijät

Happamien valumavesien muodostumisen päätekijät voidaan jakaa seuraaviin (Akcil & Koldas 2006):

1. Sulfidimineraali
2. Vesi
3. Hapetin, yleensä happi

Hapon muodostukseen vaikuttaa kuitenkin lukuiset eri tekijät kuten esimerkiksi lämpötila, pH ja raekoko (Akcil & Koldas 2006). Nämä vaikuttavat hapon tuoton nopeuteen, eli puhutaan kinetiikasta. Mahdollista muodostuvan hapon kokonaismäärää voidaan arvioida tutkimalla mineraalien koostumusta.

Lämpötila yleensä nopeuttaa kemiallisia reaktioita ja korkeampi lämpötila suosii bakteerikasvustoa. Protonit ovat tärkeimpiä ioneja, jotka aiheuttavat mineraalien hajoamista (Lahermo ym. 1996). Niinpä happamissa ympäristöissä hajoaminen on tehokkainta. Pienempi raekoko tarjoaa suuremman pinta-alan reaktioille, mikä altistaa nopeammalle kemialliselle rapautumiselle (Plumlee 1999b). Tämän takia rikastushiekat voivat hapettua nopeasti verrattuna karkeampiin aineksiin, kuten sivukiviin.

Hapontuottoon vaikuttaa rikastushiekkapatjan saturaatioaste, eli huokosten veden kyllästämä osuus ja huokosveden happipitoisuus (Akcil & Koldas 2006). Hapontuottoreaktion saatavilla olevan veden ja hapen määriin vaikuttavia tekijöitä on käsitelty myöhemmin osiossa *Hapen ja veden kulkeutuminen rikastushiekkapatjaan*.

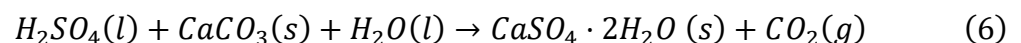
Haponmuodostuksen aktivaatioenergia vaikuttaa osaltaan haponmuodostukseen (Akcil & Koldas 2006). Aktivaatioenergialla tarkoitetaan energiaa, joka molekyyleillä törmätessään täytyy olla, että reaktio käynnistyy (Gillis ym. 2002, s. 454). Bakteerit voivat kiihdyttää hapetusreaktioita ja toimia katalyytteinä pienentäen tarvittua aktivaatioenergiaa. Ympäristöolosuhteet, kuten lämpötila ja pH ja saatavilla olevat substraatit vaikuttavat kuitenkin merkittävästi bakteerien menestykseen ja siten myös niiden katalysoivan vaikutuksen suuruus vaihtelee merkittävästä häviävän pieneen (Akcil & Koldas 2006). Esimerkiksi sulfideja hapettavien bakteerien kasvun on havaittu hidastuvan, kun pH:ta on säädetty kalsiitilla korkeammaksi (Pagnanelli ym. 2007).

Hapon muodostusta hidastavat esimerkiksi happoa kuluttavat karbonaattimineraalit kuten kalsiitti (CaCO_3), dolomiitti ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ja magnesiitti (MgCO_3). Ne reagoivat tyypillisesti yhtälön 5 mukaisesti, jossa M on metalli. Kuten happoa tuottavien mineraalienkin tapauksessa, mineraalien rapautumisnopeus vaihtelee vaikuttaen siten reaktiivisuuteen. (Plumlee 1999b)



Myös happamuus vaikuttaa kalsiitin liukenemiseen: happamissa oloissa liukeneminen on nopeampaa. Lisäksi on viitteitä, että esimerkiksi passiivisten kalkkikivisuodatukseen perustuvien käsittelymenetelmien yhteydessä esikäsitelty vesi, jossa on korkea kalsiumpitoisuus heikentää passiivisen menetelmän tehoa. Lisäksi passiivisten menetelmien vesisyötön suuruuden kasvattaminen yleensä lisää alkaliniteetin muodostusta. (Zipper & Skousen 2010)

Kun kalsiittia käytetään happaman valuman neutralointiin se voi reagoida muodostaen kipsiä yhtälön 6 mukaisesti. Muodostuva kipsi saattaa saostua myös kalsiitin pintaan heikentäen sen aktiivisuutta. Lisäksi aktiivisuutta saattavat heikentää esimerkiksi pintaan absorboituvat rauta- ja mangaani-ionit. (Payant & Yanful 1995)



Kaivannaisjätteen haponmuodostuspotentialia voidaan arvioida tutkimalla sen koostumusta. Eräs tapa on Happon-emas tasapainon arviointimenetelmä eli ABA-testi (engl. Acid Base Accounting). ABA-testi on edullinen metodi, jonka avulla voidaan arvioida materiaalin kokonaishapontuottoa suhteessa kokonaisalkaliniteettiin. Se ei huomioi mineraalien liukenemistä eikä reaktioiden kinetiikkaa ja siksi puhutaankin staattisesta testistä. (Skousen 2017)

ABA-testissä kokonaishapontuottoa arvioidaan näytteen rikki- ja kalsiumpitoisuuden perusteella. Se voidaan ilmoittaa hapontuoton neutraloimiseksi tarvittavina kiloina kalsiittia per jätetonni

(kg CaCO₃/t). Tästä käytetään lyhennettä happopotentialia eli AP (engl. Acid Potential). Neutraloitumispotentiaali eli NP määritetään mittaamalla, kuinka paljon näyte kykenee neutraloimaan tunnettua happoa. Tämä voidaan vastaavasti ilmoittaa kalsiittikiloina per jätetonni. Näiden perusteella erotuksen (yhtälö 7) voidaan määrittää nettoneutraloitumispotentiaali (NNP) tai neutraloitumispotentiaalisuhteena NP/AP. NNP-arvoa tulkitaan siten, että >20–30 kg CaCO₃/t arvot eivät tuota happoa ja <-20 – -30 kg CaCO₃/t tuottavat happoa. Tähän väliin asettuvat näytteen arvot ovat epävarmalla hapontuottoalueella. Neutralointipotentiaalisuhteen arvoja yli 2-4 pidetään happoa tuottamattomina ja arvoja alle yhden happoa tuottavina. (Bernd Lottermoser 2010)

$$NNP = NP - AP \quad (7)$$

3.2 Hapen ja veden kulkeutuminen rikastushiekkapatjaan

Sadanta on yleensä veden pääasiallinen lähde rikastushiekka-altaissa tapahtuvissa reaktioissa. Kaikki sadanta ei kuitenkaan huuhtoudu rikastushiekkapatjaan vaan iso osa haihtuu pintarakenteissa tai muodostaa pintavaluntaa. (Herbert & Höglund 2004) Veden kulkeutumisenopeutta kuvaa hydraulinen johtavuus, josta voidaan käyttää myös esimerkiksi nimityksiä vedenjohtokyky ja vedenjohtavuus. Se on materiaalin ominaisuus, jota voidaan myös mitata ja arvioida. Lisäksi vedenjohtavuuteen vaikuttaa hydraulinen gradientti, eli paine-eroista johtuva ajava voima. (Fitts 2013, Herbert & Höglund 2004) Veden kulkeutumista maassa voidaan kuvata Darcyn lailla, joka voidaan ilmaista saturoituneelle maalle esimerkiksi yksiulotteisesti yhtälön 8 mukaisesti. Darcyn nopeuden perusteella voidaan arvioida keskimääräistä virtausnopeutta huokosissa jakamalla se veden virtaukselle käytettävissä olevalla huokoisuudella, eli nk. tehollisella huokoisuudella.

$$q = -K \frac{dh}{ds} \quad (8)$$

missä q on Darcyn nopeus [m/s]
 dh/ds on gradientti, jossa h on korkeusero ja s on suotautuva matka
 K on vedenjohtavuus [m/s].

Veden virtaus osittain saturoituneessa maassa saattaa hidastua huomattavasti huokosiin varastoituneiden kaasujen takia. Tämän vuoksi osittain saturoituneen maan hydraulista johtavuutta on korjattava ottamaan huomioon myös tämä ilmiö. (Herbert & Höglund 2004) Vedenjohtavuutta ei voida siis pitää vakiona vaan se riippuu materiaalin vesipitoisuudesta. Yhtälöä 7 voidaan käyttää osittain saturoituneelle maalle, jos käytetään vakiovedenjohtavuuden tilalla vedenjohtavuutta, joka on vesipitoisuuden funktio ja vedenkorkeuden tilalla paine-eroa, joka on korkeuseron ja vesipitoisuudesta riippuvan imun funktio. Tätä voidaan arvioida, jos tiedetään materiaalille ominainen vedenpidätyskäyrä, joka esitetään yleensä vesipitoisuuden ja materiaaliin kohdistuvan imun suhteena. Vesipitoisuus vaihtelee jäännösvesipitoisuuden (jota ei saada imemällä pois) ja saturoituneen vesipitoisuuden välillä. Lisäksi vedenjohtavuus riippuu esimerkiksi veden tiheydestä ja viskositeetistä, eli siten lämpötilasta. (Fitts. 2013)

Rikastushiekka-allas voi olla rakennettu rakoilemattoman peruskallion päälle, jolloin sen hyvin pieni hydraulinen johtavuus verrattuna päällä oleviin maa-aineksiin suuntaa veden virtauksen pääasiassa horisontaaliseksi (Herbert & Höglund 2004). Horisontaalinen virtaus tarkoittaa siis, että suotovedet eivät suotaudu altaan alla olevaan pohjaveteen vaan päätyvät rikastushiekka-altaiden reunoille. Rikastushiekka-altaan pohjan pieni vedenläpäisevyys voidaan saavuttaa myös esimerkiksi kalvorakentein, joita on Suomessa käytössä esimerkiksi Suurkuusikon ja Laivan kultakaivoksilla, Luikonlahden kuparikaivoksella sekä Kevitsan kupari- ja nikkelikaivoksella (Välisalo 2013). Yleensä kalvojen alla käytetään lisäksi heikosti läpäisevää mineraalista kerrosta. Esimerkiksi Suurkuusikon kaivoksella uusin NP4-rikastushiekka-allas on rakennettu metrin moreenikerroksen päälle (vedenjohtavuus $<10^{-7}$ m/s), jonka päälle on asennettu vettä läpäisemätön geomembraani (Pöyry 2016). Pyhäsalmen kupari ja sinkkikaivoksen rikastushiekka-altaat on puolestaan rakennettu turpeen päälle, joka ympäristölupahakemuksen ja luvan mukaan on tiivistynyt lähes vettä läpäisemättömäksi

ja tilanne vastaa siten kallion päälle rakennettua allasta (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2007).

Happi voi kulkeutua rikastushiekkapatjaan veden tai ilman virtauksen ja diffuusion avulla (Herbert & Höglund 2004). Diffuusiolla tarkoitetaan molekyylien törmäilystä johtuvaa konsentraatioerojen tasoittumista (Fitts 2013). Happi kulkeutuu ilman mukana huomattavasti nopeammin kuin veden. Koska happi liukenee veteen melko heikosti, kulkeutuu virtaavan veden mukana huomattavasti vähemmän happea kuin virtaavan ilman mukana. Ilmavirta ei kuitenkaan ole yleensä ole ongelma hienojakoisessa rikastushiekassa. Diffuusio on yleensä hapen kulkeutumisen vallitseva mekanismi, sillä kuten edellä mainittiin, hapen liukenevuus veteen on melko pieni, eikä suotautuvan veden mukana kulkeudu yhtä paljon happea kuin diffuusion. Hapen diffuusio on vedessä huomattavasti ilmaa hitaampaa ja siksi rikastushiekka-altaiden sulkemisessa käytetäänkin kuiva- ja vesipeittoja. (Herbert & Höglund 2004)

3.3 Peittorakenteiden käyttö happaman valuman estämiseen rikastushiekka-altaista

Mineraalien rikastamisessa poistettavaa prosessivirtaa kutsutaan rikastushiekaksi. Se on tyypillisesti hienojakoista sisältäen vettä ja kiintoainesta. Sitä voidaan pumpata lietteenä rikastushiekka-altaisiin. Sulfidipitoiset rikastushiekat tuottavat hapettuessaan happamia valumavesiä, joten hapettuminen pyritään estämään esimerkiksi peittämällä rikastushiekka-altaat. Yleisemmin sulfidisten rikastushiekkojen peittämisen tavoitteena on minimoida hapen kulkeutuminen rikastushiekkaan ja vähentää patjan läpi ja patovyöhykkeeltä suotautuvien vesien määrää (Herbert & Höglund 2004). Yleensä toiminnan aikana rikastushiekka-altaat pidetään peitettynä vedellä. Kun tiedetään, että rikastushiekkaa ei tulla hyödyntämään missään, voidaan toteuttaa lopullinen peittäminen. Tästä rakenteesta voidaan käyttää nimitystä peitto- tai peiterakenne. Peittorakenteen soveltuvuus riippuu paljon esimerkiksi paikallisesta ympäristöoloista ja rikastushiekan ominaisuuksista, joten yleispätevien rakenteiden ja ohjeiden muodostaminen on vaikeaa (Zhang ym. 2016).

Luulajan yliopiston koordinoiman MiMi-hankkeen (Mitigation of the Environmental Impact from Mining Waste) loppuraportissa rikastushiekka-altaiden peittorakenteet jaetaan niiden päätoimintaperiaatteen mukaan seuraavasti (Herbert & Höglund 2004):

- yksinkertaiset maapeitot,
- kapillaarisulut,
- happea kuluttavat kerrokset,
- kerrokset, joilla on pieni vedenjohtavuus,
- reaktiota hidastavat kerrokset ja
- vesipeitot.

Rakennettavat peitot yhdistelevät näitä rakenteita ja toimintaperiaatteita (Herbert & Höglund 2004). Vesipeitot eroavat kuivapeitoista pysyvällä vesikerroksen, vaikka kuivapeitoissakin usein pyritään pitämään kerrosten huokoset mahdollisimman täynnä vettä. Edellä esitettyjen toimintaperiaatteiden lisäksi on myös peittoja, jotka perustuvat suotautuvan veden määrän vähentämiseen varastoimalla sadevettä lähelle maanpintaa siten, että vesi haihtuu helposti (Store- and release covers) (Vanapalli ym. 1997). Tämä vaatii kuitenkin toimiakseen riittävän suuren haihdunnan suhteessa sadantaan. Peittorakenteita on MiMi-hankkeen lisäksi käsitelty kattavasti esimerkiksi kanadalaisessa MEND-hankkeessa, jonka julkaisut ovat ilmaiseksi saatavissa osoitteessa mend-nedem.org.

Yksinkertainen maapeitto voi toimia hapen diffuusioesteenä esimerkiksi, jos se on rakennettu hienoainesta sisältävistä aineksista, kuten savesta ja huokoskoko on siten pieni. Tämä nostaa materiaalin vedenpidätuskykyä ja kerros pysyy todennäköisemmin saturoituneena suuremmissakin haihdunnan eli evapotranspiraation aiheuttamissa alipaineissa. Yleensä yksikerroksiset yksinkertaiset maapeitot vaativat kuitenkin toimiakseen sitä suosivat olosuhteet, eli esimerkiksi lähellä peittomaanpintaa-olevan jätetäytön vesipinnan (tai jätetäyttöön nousevan pohjaveden). Matalalla oleva pohjavesi altistaa peiton kuivumiselle, joka nopeuttaa hapen diffuusiota. (Herbert & Höglund 2004)

Yksinkertaista maapeittoa käytetään myös eroosiosuojauksessa ja siten pölyämisen estämisessä, jos jätemateriaali ei ole reaktiivista (O'Kane Consultants Inc. 2012).

Hieno materiaali karkeamman päällä muodostaa kapillaarisulun (O'Kane Consultants Inc. 2012). Kapillaarisulku perustuu eroihin materiaalien huokoskoossa. Hienommalla materiaalilla vedenpidätyskyky on suurempi, koska pintajännityksestä johtuvat kapillaarivoimat ovat suurempia (Fitts 2013). Toisin sanoen pintajännitykselle on tarjolla enemmän pinta-alaa hienommassa materiaalissa. Kuivissa olosuhteissa alla oleva karkeampi materiaali kuivaa nopeasti kenttäkapasiteettiinsa, mutta sen kapillaari-imu ei riitä kuivattamaan ylempää hienoainesta ja ylempi kerros pysyy siten kosteampana verrattuna tilanteeseen, jossa molemmat kerrokset olisivat hienoa materiaalia (O'Kane Consultants Inc. 2012). Kapillaarisulkujen on havaittu oikein suunniteltuna vähentävän veden kulkeutumista puolikuivassa ilmastossa ja rajoittavan hapen kulkeutumista kosteassa ilmastossa (Dagenais ym. 2005). Kapillaarisulkurakenteen hieno materiaali voidaan edelleen peittää karkeammalla materiaalilla haihtumisen vähentämiseksi tai maan pinnan läheisen vesivaraston lisäämiseksi. Vesivaraston lisääminen vähentää sopivassa ilmastossa suotautuvan veden määrää lisäämällä helposti haihdunnalle saatavissa olevaa vettä. (O'Kane Consultants Inc. 2012)

Happea kuluttavaa materiaalia voidaan käyttää estämään hapen diffuusiota rikastushiekkapatjaan. Orgaanisen materiaalin hajoaminen kuluttaa happea, joka vähentää siten sekä diffuusiota että suotoveden mukana kulkeutuvaa happea. Esimerkiksi runsaasti orgaanista ainetta sisältävän yhdyskuntalietteen on havaittu olevan aluksi tehokas keino muihin peittoihin verrattuna. (Alakangas & Öhlander 2006) Orgaanisen materiaalin kuluminen on kuitenkin ongelma ja se kyseenalaistaa rakenteen pitkäaikaisen käytön. Myöhemmissä tutkimuksissa todettiin kahdeksan vuoden aikana orgaanisen aineksen osuuden lietteessä vähentyneen 78 prosentista 14 prosenttiin, viitaten mahdollisesti heikkoon pitempiaikaiseen tehoon (Nason ym. 2013).

Peittorakenteet, joissa on käytetty hyvin heikosti vettä läpäiseviä materiaaleja estävät sadeveden suotautumista ja ovat yleisessä käytössä myös kaatopaikkojen

pintarakenteissa. Osana monikerrospeittoa hitaasti vettä läpäisevä kerros myös lisää ylempien kerroksien huokosvesipitoisuutta hidastaen hapen diffuusiota. Materiaaleina voidaan käyttää esimerkiksi savea, geosynteettisiä tuotteita tai savista moreenia. Pieni vedenjohtavuus lisää pinta-valuntaa lisäten tarvetta ylemmälle suojakerrokselle eroosion estämiseksi. (Herbert & Höglund 2004)

Reaktioita inhiboivat peitot perustuvat esimerkiksi reaktiota katalysoivien bakteerien aktiivisuuden pienentämiseen joko reaktio-oloja muuttamalla tai biosidejä hyödyntämällä. Lisäksi on tutkittu erilaisia pyriitin reaktiivisuutta pienentäviä kemikaaleja, jotka reagoidessaan muodostavat pyriitin pintaan reaktiivisuutta pienentävän pinnoitteen. (Herbert & Höglund 2004) Alkaliset peitot voivat reagoida rikastushiekan kanssa tuottaen kerrosten rajapintaan saostumia. Saostumat voivat muodostaa kovan kerroksen, joka hidastaa hapen kulkeutumista patjaan estämällä veden ja kaasujen kulkua. (Quispe ym. 2013) Alkalinen peitto saattaa myös muodostaa happoa muodostavien mineraalien pintaan passivoivan kerroksen (INAP 2004). Alumiinituotannon sivutuotteena syntyvän alkalisen saven käyttö hiilikaivoksen jätteen peittoon on todettu neutraloivan muodostuvia vesiä ja pienentävän metallipitoisuuksia (Plaza ym. 2018).

Vesipeittoja pidetään parhaana ratkaisuna vielä hapettumattomien sulfidirikastushiekkojen hapon tuoton ehkäisemiseksi. Vesi toimii diffuusioesteena peitossa ja hidastaa hapetusreaktioita, sillä hapen suhteen kyllästyneenäkin vesi on melko vähähappista: pitoisuudet ovat noin 30-kertaa pienemmät kuin ilmakehässä. (Hogan & Tremblay 2001) Vesipeittoja ei voida kuitenkaan käyttää, jos suotovesiä muodostuu liikaa, riittävää vesikerrosta ei saada muodostettua tai patorakenteita ei saada stabiloitua taloudellisesti (Wels ym. 2000). Vesipeiton suunnittelussa on minimoitava myös tuulen vaikutukset kuten hapekkaan veden sekoittuminen tai hienoaineksen uudelleen suspendoituminen (Peinedrud 2003). Esimerkiksi Ruotsissa Stekenjokkin rikastushiekka-aldaiden sulkeminen vesipeitolla on saavuttanut vedelle asetetut laatuvaatimukset. Kuitenkin altaan patoturvallisuutta on jouduttu tarkkailemaan ja parantamaan useita kertoja lisätietojen karttuessa. (Eriksson 2016)

Kuivapeittoja käytettäessä routiminen voi aiheuttaa ongelmia, mikäli peittomateriaali perustuu pieneen vedenjohtavuuteen. Erityisesti monikerrospeitoissa routimisen vaikutukset on otettava huomioon. Jäätymis-sulamissykli voi aiheuttaa kasvanutta hydraulista johtavuutta, vaikka jäälinssien muodostumista ja routanousua materiaalissa ei tapahtuisikaan, mikä johtuu partikkelien uudelleen järjestymisen aiheuttamasta huokosten muodostamisesta (O'Kane Consultants Inc. 2012). Lisäksi kuivapeitoille mahdollisia ongelmia voi aiheuttaa kuivumisesta johtuva halkeilu. Myös kasvillisuuden on todettu lisäävän hapen kulkeutumista, mutta toisaalta keräävän hivenaineita itseensä (Plaza ym. 2018).

Kasvillisuuden vaikutus jää pienemmäksi, mikäli käytetään paksua kasvukerrosta. Juuriston läpäisy saattaa kuitenkin lisätä hapen kulkeutumista pintakerrosten läpi, kuten alkalista savea tutkittaessa (Plaza ym. 2018). Kasvillisuus sitoo vettä ja lisää evapotranspiraatiota todennäköisesti siten vähentäen muodostuvan huuhtouman määrää. Jos haitta-aineita nousee kapillaarinousun mukaan ylemmäksi, kuten havaittiin Kiinan koekentissä (Zhang ym. 2016), kasvillisuus sitoo haitta-aineita itseensä. Kapillaarisulkurakenteen käyttäminen todennäköisesti vähentää tätä ilmiötä.

Peittojen rakennettavuudessa on otettava huomioon rikastushiekan ominaisuudet. Hienojakeiset rikastushiekat ovat yleensä geoteknisesti heikkoja ja konsolidoituvia aiheuttaen haasteita rakentamiselle (Wels ym. 2000). Konsolidoitumisella tarkoitetaan hienojakeisen materiaalin hidasta painumista, kun huokosveden paine pääsee hitaasti laskemaan. Konsolidaatio on yleistä esimerkiksi savilla. Usein rikastushiekat ovat rikastushiekka-altaisiin pumpattaessa lajittuneet siten, että hienommat partikkelit ovat kulkeutuneet keskelle allasta ja karkeammat jääneet lähemmäksi reunoja (INAP 2004). Hienoimmat ja eniten painuvat osat ovat siis altaan keskellä.

Paikallisesti vaihteleva konsolidaatio saattaa heikentää monikerrosrakenteiden yhtenäisyyttä vaikeuttaen toimivan kerrosrakenteen rakentamista. Konsolidaation yhteydessä rikastushiekan mahdollisesti haitta-aineita sisältävä huokosvesi irtoaa ja vaatii

todennäköisesti käsittelyä. Veden käsittely saattaa aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia.
(Wels ym. 2000)

4 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Tässä diplomityössä tutkittiin SMA Mineralin alkalisten, eli neutralointiin kykenevien sivutuotteiden käyttöä Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekan peittorakenteena pilotmittakaavan lysimetrikokeessa. Pilotti-kokoluokan kokeet tarjoavat laboratoriokokeita realistisempia olosuhteita täysimittaisia koekenttiä pienemmillä kustannuksilla ja niitä käytetään yleisesti peittoratkaisuja tutkittaessa (Alakangas & Öhlander. 2006, Karlsson ym. 2018, Larkins ym. 2016).

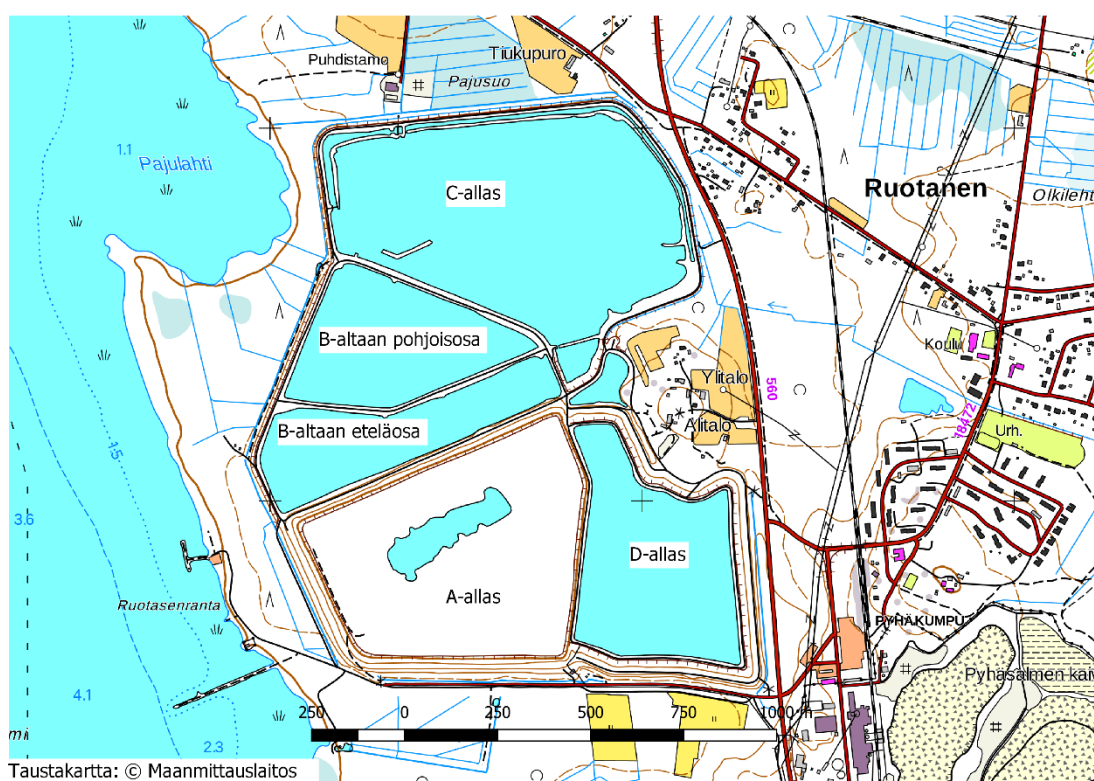
Alkalisten materiaalien käyttö peittorakenteessa neutraloi muodostuvaa hapanta valumaa ja pH:n pitäminen korkeampana pienentää useimpien metallien liukoisuutta. Alkalisten materiaalien käyttö pH:n nostamiseen hidastaa myös rautaa hapettavien bakteerien kasvua (Pagnanelli ym. 2007). Kuivapeittojen käytön on todettu merkittävästi vähentävän hapon tuottoa, muttei pysäyttävän sitä kokonaan. Suotoveden pitäminen neutraalina edellyttää siis riittävää neutralointikykyä joko rikastushiekassa tai muissa rakenteissa. (Herbert & Höglund 2004) Toisaalta suuren rikastushiekkamäärän annettaessa täysin hapettua neutralointiin vaadittavat alkalisten materiaalien määrät nousevat mahdottoman suuriksi. Peittorakenteiden täytyy siis myös täyttää fysikaaliset vaatimukset, eli toimia hapen kulkeutumisen estäjänä pitämällä rikastushiekka saturoituneena.

Uusiomateriaalien käyttöä Pyhäsalmen rikastushiekka-altaiden peittorakenteessa on tutkittu Karjalaisen diplomityössä 2016. Kuitusavelle, tuhkille, kipsille, valimohiekoille ja valimopölylle aiemmin tehtyjä laboratoriotuloksia vertailtiin parhaiden materiaalien löytämiseksi. Tarkasteltuja parametreja olivat esimerkiksi vedenläpäisevyys, lujuus ja haitta-aineiden liukoisuudet. Tuloksien pohjalta suunniteltiin lysimetrikoe Pyhäsalmen kaivokselle. Parhaiten soveltuvaksi materiaaliksi arvioitiin tuhka sen saatavuuden, logistiikan ja ominaisuuksien perusteella. (Karjalainen 2016) Keväällä 2016 kymmenen 1,5 metriä korkeaa 1,5 metriä halkaisijaltaan olevaa lysimetriä saatiin rakennettua

Pyhäsalmele. Rakenteet on ympäröity hiekalla jäätymisen ehkäisemiseksi. Julkaistuja tuloksia testeistä ei vielä ole. (Larkins ym. 2016)

SMA Mineral Oy:n Röyttän kalkkitehdas rakennettiin Outokummun terästehtaan läheisyyteen 2002. Se tuottaa poltettua kalkkia, sammutettua kalkkia ja kalkkikiveä eri jakeissa. (SMA Mineral 2017) Tuotteiden lisäksi sivutuotteina syntyvät kalsiittikivestä pois seulottu hienoaines, eli kalsiitti-alite, epäkurantti eli osittain palanut poltetu kalkki ja suodatinpöly. Syntyviä sivutuotteita hyödynnetään jonkin verran esimerkiksi maataloudessa ja maanrakennuksessa, mutta kysyntä ei riitä kuluttamaan kaikkia syntyviä materiaalivirtoja tällä hetkellä. Maanrakennuksessa kalkinpolton sivutuotteita voi käyttää ilmoitusmenettelyllä väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa MARA-asetuksen mukaisesti (VNA 843/2017). Muissa kohteissa niiden käyttö vaatii ympäristöluvan.

Pyhäsalmen kaivoksesta louhitaan sinkki-, kupari-, ja rikkimalmia. Kaivos aloitti avolouhoksena 1962 ja on siirtynyt myöhemmin maanalaiseen louhintaan ollen nyt Euroopan syvimpiä kaivoksia. Malmin rikastus koostuu murskauksesta, jauhatuksesta, vaahdotuksesta ja vedenpoistosta. Lopputuotteita ovat kupari-, sinkki- ja pyriittirikasteet. 2016 kaivoksen arvioitu jäljellä oleva elinikä oli 6 vuotta. Pyhäsalmi Mine Oy on First Quantum Mineralsin omistama tytäryhtiö. (First Quantum Minerals Ltd. 2016) Pyhäsalmissa rikastushiekkaa syntyy n. 30-40% nostetusta malmimäärästä. Kaivoksen ympäristöluvassa sallitaan rikastushiekan käyttö kaivostäyttöön. Valtaosa rikastushiekasta loppusijoitetaan kuitenkin rikastushiekka-altaisiin, jotka suljetaan kaivostoiminnan päättyttyä. (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2007) Rikastushiekka-altaiden mittakaava on näytetty kuvassa 1.



Kuva 1. Karttakuva Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-altaista (Taustakartta: Maanmittauslaitos)

Pyhäsalmen rikastushiekka-altaista A-allas on suljettu ennen kaivannaisjäteasetuksen voimaantuloa, jolloin sitä ei koske tämän asetuksen sisältämät vaatimukset (Pohjois-Suomen aluehallintovirasto 2017). Päivitetty sulkemissuunnitelma on jätetty ympäristöviranomaiselle lokakuussa 2018 (Hänninen 2019). Rikastushiekka-altaat D ja B-allaan pohjoisosa on luokiteltu suuronnettomuuden vaaraa aiheuttavaksi kaivannaisjätteen jätealueeksi altaisiin sijoitettavien vaarallisten jätteiden määrän vuoksi (Pohjois-Suomen Aluehallintovirasto 2017).

Mahdollisuutta vaahdottaa Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekkaa hapontuoton pienentämiseksi on tutkittu Nuorivaaran diplomityössä 2015. Työssä saatiin parhaimmillaan pienennettyä rikastushiekan neutraloimispotentiaalisuhde (engl. Neutralization potential ratio eli NPR) lähelle epävarmaa hapontuotto aluetta. Tämä tarkoittaa, että rikastushiekan neutraloimispotentiaali suhteessa haponmuodostuspotentiaaliin on lähellä yhtä (EN 15875:2011). Tuloksena työssä

todettiin, että ensiluokkaisen ympäristökelpoisuuden ja taloudellisen kannattavuuden saavuttamiseksi tarvitaan vielä tutkimusta (Nuorivaara 2015) Vaahdotus on tarkkailua vaativa prosessi ja sen käyttö happaman valuman ehkäisyyn soveltuu parhaiten, kun sitä on toteutettu osana sulkemissuunnitelmaa kaivoksen toiminnan alusta asti. Näin rikastushiekkaa ei tarvitse siirtää uudelleen altaista vaahdotettavaksi.

4.1 Tutkittavat materiaalit

Kokeeseen valikoitui 3 kalkkituotetta riittävän suuren kapasiteetin saatavuuden ja ominaisuuksien perusteella. Nämä tuotteet olivat:

- Kalkmix Mild raekoolta 0-5 mm,
- kalsiitti raekoolta 0-5 mm ja
- Kalkmix Normal.

Lisäksi testin rakenteissa käytettiin Pyhäsalmen tuotetta rikastushiekkaa ja Torniossa paikalliselta toimittajalta ostettua hienoainesmoreenia.

Uunille kelpaamaton kalsiittijae muodostuu pehmeää kalkkikiveä siirrettäessä, esimerkiksi laivakuljetuksissa tai itse louhinnan yhteydessä. Liian hienoa jaetta (raekoko <15mm) ei voida polttaa Tornion tehtaan uunityypillä ja se seulotaan erilleen. Kalkmix Mild on pääosin alitekalsiittia, jossa on seassa osittain palanutta kalkkia sisältävää kalkinpolttoprosessin suodatinpölyä. Kalkmix Mild on ollut ulkovarastoinnissa, mikä todennäköisesti laskee sen reaktiivisuutta. Poltetu kalkki on veden kanssa kosketuksiin joutuessaan sammunut. Lisäksi osa reaktiivisesta kalkista saattaa olla liennut ja kulkeutunut pois säilytyksen aikana. Työssä testatut Kalkmix Mild on 5 mm seulan läpäissyt jae alkuperäisestä 0-15mm jakeesta. Vastaava 0-5 mm Kalsiitti on tutkimuksessa vertailukohteena Mild-materiaalille. Raekooltaan välillä 0-15 mm olevaa kalsiittia on saatavilla laivakuljetuksena suuria määriä.

Epäkurantti poltettu kalkki on tuotenimeltään Kalkmix Normal. Se on osittain palanutta kalkkia, joka ei täytä terästeollisuuden laatuvaatimuksia. Sitä syntyy kalkkiuunien käynnistyksen, alasajon ja häiriötilanteiden yhteydessä. Kalkmix Normal-materiaalille on vuonna 2015 tehty liukoisuustestit, jossa myös neutralointikykyä on mitattu standardin SFS-EN 12945 mukaisesti. Neutraloiva kyky ja nopeavaikutteinen neutraloiva kyky olivat molemmat 60% (CA). Käsituntumalta Kalkmix Normal muistuttaa savea, mutta siinä on myös karkeampia jakeita. Kosteuden kanssa tekemisiin joutuessaan se muodostaa tahnaa ja kuivuessaan kovettuu kuten savi. Nämä ominaisuudet tekevät perinteisestä kuivaamisesta ja seulomisesta vaikeaa.

Poltettua kalkkia ja kalsiittia on vertailtu tutkimuksessa, jossa päämääränä oli käsitellä hapettunutta rikastushiekkaa ennen vesipeiton rakentamista. Tavoite oli nostaa veden pH:ta pitkäkestoisesti ja pienentää liuenneiden metallien pitoisuuksia. Tutkimuksessa todettiin kalsiitin sopivan todennäköisesti paremmin pitkäkestoiseen neutralointiin, lähinnä kalsiitin pienemmän liukoisuuden ansiosta. Poltettu kalkki laski aluksi nopeasti pH:ta ja metallien liukoisia pitoisuuksia, mutta sen vaikutukset heikkenivät ajan myötä. Lisäksi kalsiumoksidia kului esimerkiksi jarosiitin muuttumiseen kipsiksi, jota ei samassa mittakaavassa tapahtunut kalsiittia käytettäessä. (Catalan & Yin 2003)

Pyhäsalmissa rikastushiekkaa on arvioitu syntyvän noin 30-40% nostetusta malmin määrästä. Pyhäsalmen rikastushiekka on happoa tuottavaa. Se on luokiteltu jäteluokkaan 01 03 04* - Sulfidimalmin käsittelyssä syntyvät happoa muodostavat rikastushiekat. Lisäksi se on luokiteltu vaaralliseksi jätteeksi (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2007) Pyhäsalmen rikastushiekasta on mitattu pilaantuneen maan ylemmän ohjearvon ylittäviä pitoisuuksia arseenia, kuparia ja sinkkiä, sekä alemman ohjearvon ylittäviä pitoisuuksia lyijyä (Heikkinen & Toropainen 2006). Peitettäväksi suunniteltavien alueiden koot on esitelty myöhemmin taulukossa 4. taloudellisen tarkastelun yhteydessä.

Pyhäsalmen rikastushiekanäytteen laskennallinen NPR-arvo on pieni (0,17) ja se sisälsi paljon sulfidimineraaleja ja vähän neutraloivia mineraaleja (Heikkinen & Toropainen 2006). Tämän työn yhteydessä teetettyjen ABA-testien perusteella työssä käytetyn

rikastushiekan NPR-arvo on vielä matalampi 0,01. Nuorivaaran (2015) diplomityössä tutkitun Pyhäsalmen rikastushiekan NPR-arvo oli puolestaan 0,07. Tämän työn rakenteissa ja tutkimuksissa käytetty rikastushiekka oli tuoretta. Sen rapautuminen käynnistymistä voidaan arvioida lysimetrin 1 pH-redox -arvojen kehittymistä seuraamalla. Rikastushiekka on neutraloitu sammutetulla kalkilla ennen pumppaamista rikastushiekka-altaisiin.

Moreeni on valittu vertailukohdaksi kuvaamaan 2007 ympäristöluvassa kuvattua rikastushiekka-altaan peittorakennetta. D-altaan peittoratkaisu koostuu alhaalta ylöspäin 300 mm:n tiivistyskerroksesta 500 mm:n suojakerroksesta ja 50-100 mm:n kasvukerroksesta. Tiivistyskerroksen vedenläpäisy on enintään 10^{-8} m/s ja suojakerroksen vastaavasti 10^{-7} m/s. (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto, 2007) Tämä tarkoittaa, että moreenin tulee sisältää riittävästi hienoainesta. Kokeeseen tilattiin tavarantoimittajalta hienoainesmoreenina, jolle oli testien perusteella saatu vedenjohtavuuden keskiarvoksi $1,52 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Kaikkien kalkkitehtaan sivuvirtojen liukoisuudet L/S suhteella 10 on analysoitu vuonna 2012. Liukoisuuksien perusteella Kalkkituotteet luokiteltaisiin tavanomaiseksi jätteeksi. L/S suhteella tarkoitetaan nesteen ja kiintoaineksen suhdetta liukoisuustesteissä. Tulokset on esitetty taulukossa 1 milligrammoina kiintoainekiloa kohden. Kalkmix Normalille, ja Kalkmix Mildille on kaksi analyysitulosta. Liuenneiden aineiden kokonaispitoisuutta on taulukossa merkitty lyhenteellä TDS (Total Dissolved Solids) ja liuennutta orgaanista hiiltä lyhenteellä DOC (Dissolved Organic Carbon). Kaikki tuotteet alittivat kaikki vaaralliselle jätteelle asetetut raja-arvot (raja-arvo II), mutta Normal ylitti pysyvän jätteen raja-arvoista (raja-arvo I) kloridin, kromin ja liuenneiden aineiden kokonaismäärälle asetetut arvot. Normal-materiaalin analyysituloksella oli juuri pysyvän jätteen raja-arvon suuruinen fluoridin mittauksessa. Kalkmix Mild-materiaalista puolestaan liukeni pysyvän jätteen raja-arvot ylittäviä pitoisuuksia kloridia, sulfaattia, fluoridia, molybdeenia ja lyijyä. Myös Mildin liuenneiden aineiden kokonaispitoisuus ylitti pysyvän jätteen raja-arvon. Alitekalsiitti alitti pysyvän jätteen raja-arvot kaikkien liukoisten pitoisuuksien

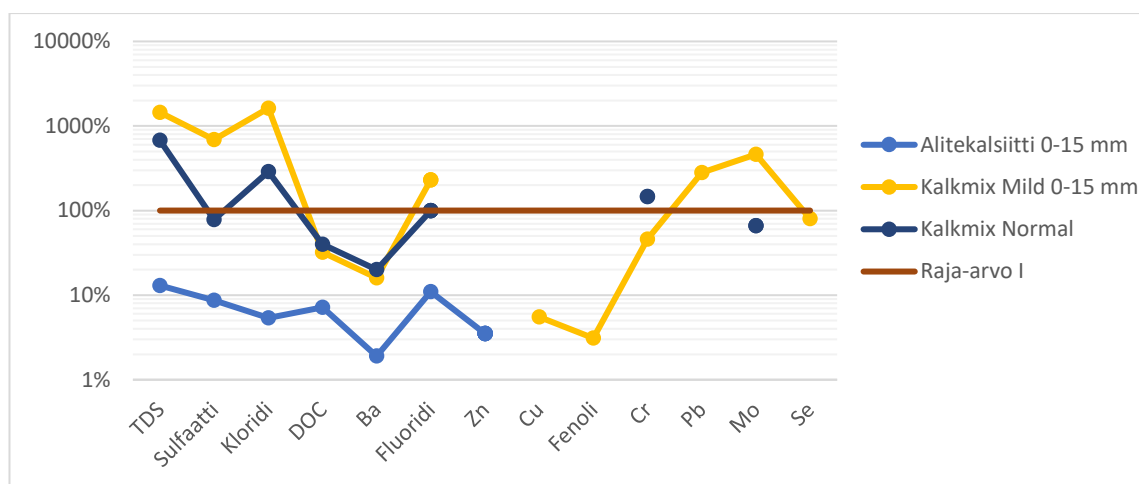
osalta. Liukoiset pitoisuudet, antimonin, sinkin, elohopean, kadmiumin, koboltin, vanadiinin, arseenin ja nikkelin alittivat analyysirajat kaikkien materiaalien tapauksessa.

Taulukko 1. Kalkkituotteiden liukoisten aineiden analyysit (L/S=10) vuodelta 2012 ja jätteen luokittelun raja-arvot (VNa 2.5.2013/331), Raja-arvot alittavat mittaukset on esitetty vihreällä, raja-arvon I keltaisella ja raja-arvon II punaisella

Analyysi [mg/kg ka]	Kalkmix Mild 0-15		Kalkmix Normal		Kalsiitti 0-15	Raja- arvo I	Raja- arvo II
TDS	38000	58000	27000	27000	520	4000	60000
Sulfaatti	5300	6900	570	780	87	1000	20000
Kloridi	13000	11000	2300	2000	43	800	15000
DOC	140	160	200	190	36	500	800
Ba	2,1	3,2	4	3,9	0,38	20	100
Fluoridi	23	11	8,1	10	1,1	10	150
Zn	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,14	4	50
Cu	0,11	0,11	<0,059	<0,059	<0,050	2	50
Fenoli	0,027	0,031	<0,024	<0,023	<0,020	1	-
As	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,5	2
Cr	0,18	0,23	0,73	0,66	<0,10	0,5	10
Mo	1,7	2,3	0,33	0,33	<0,050	0,5	10
Pb	0,42	1,4	<0,015	<0,015	<0,15	0,5	10
Ni	<0,063	<0,057	<0,050	<0,050	<0,050	0,4	10
Se	0,067	0,08	<0,055	<0,052	<0,020	0,1	0,5
Sb	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,010	0,06	0,7
Cd	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	0,04	1
Hg	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	0,01	0,2
Co	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	-	-
V	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	-	-

Analyysirajat ylittävät mittaukset suhteessa pysyvän jätteen raja-arvoon on esitetty kuvassa 2. Materiaaleista, joista on kaksi näytettä, korkeampi mitattu pitoisuus on esitetty

kuvassa. Liuenneiden aineiden kokonaispitoisuudet ovat raja-arvoon 1 nähden yli kymmenkertaisia materiaalilla Kalkmix Mild ja lähes kymmenkertaisia materiaalilla Kalkmix Normal. Kalkmix Mild-materiaalista liukenevat sulfaatin ja kloridin pitoisuudet ovat korkeat verrattuna muihin materiaaleihin.



Kuva 2. Kalkkimateriaalien analyysirajat ylittävät liukoisuustestien tulokset (L/S=10) vuodelta 2012 normalisoituna pysyvän jätteen raja-arvojen suhteen (VNa 2.5.2013/331)

4.2 Koerakenteet

Veden virtausta maan lävitse on yleisesti tutkittu lysimetreillä (Corwin 1999). Lysimetri on laite, jolla voidaan tutkia esimerkiksi veden, kaasujen ja haitta-aineiden liikkumista maassa. Se on yksinkertaisimmillaan sylinteri, joka sisältää maa-ainesta ja jonka läpi kulkeutuva vesi voidaan kerätä ja analysoida. Yksi lysimetrikokeiden suurimmista mahdollisista virhelähteistä on usein reunavirtaus, jossa vesi löytää helpoimman virtausreitin lysimetrin reunan ja maa-aineksen välistä (Corwin 1999). Laboratoriomittakaavassa vastaavasta koerakenteesta käytetään yleensä nimitystä kolonnikoe. Niitä käytetään myös yleisesti materiaalien liukoisuuksien ja vedenjohtavuuksien arvioimiseen. Esimerkiksi alkalisen saven vaikutusta happamaan valumaan on tutkittu kolonnikokein (Plaza ym. 2018). Kolonnikokeita käytettiin myös lyijy- ja sinkkikaivoksen rikastushiekan peittomateriaalien tutkimuksessa (Zhang ym.

2016). Laboratoriossa olosuhteet ovat helpommin kontrolloitavissa, mutta suuremman mittakaavan kokeet ovat lähempänä rikastushiekka-altaiden todellisia olosuhteita.

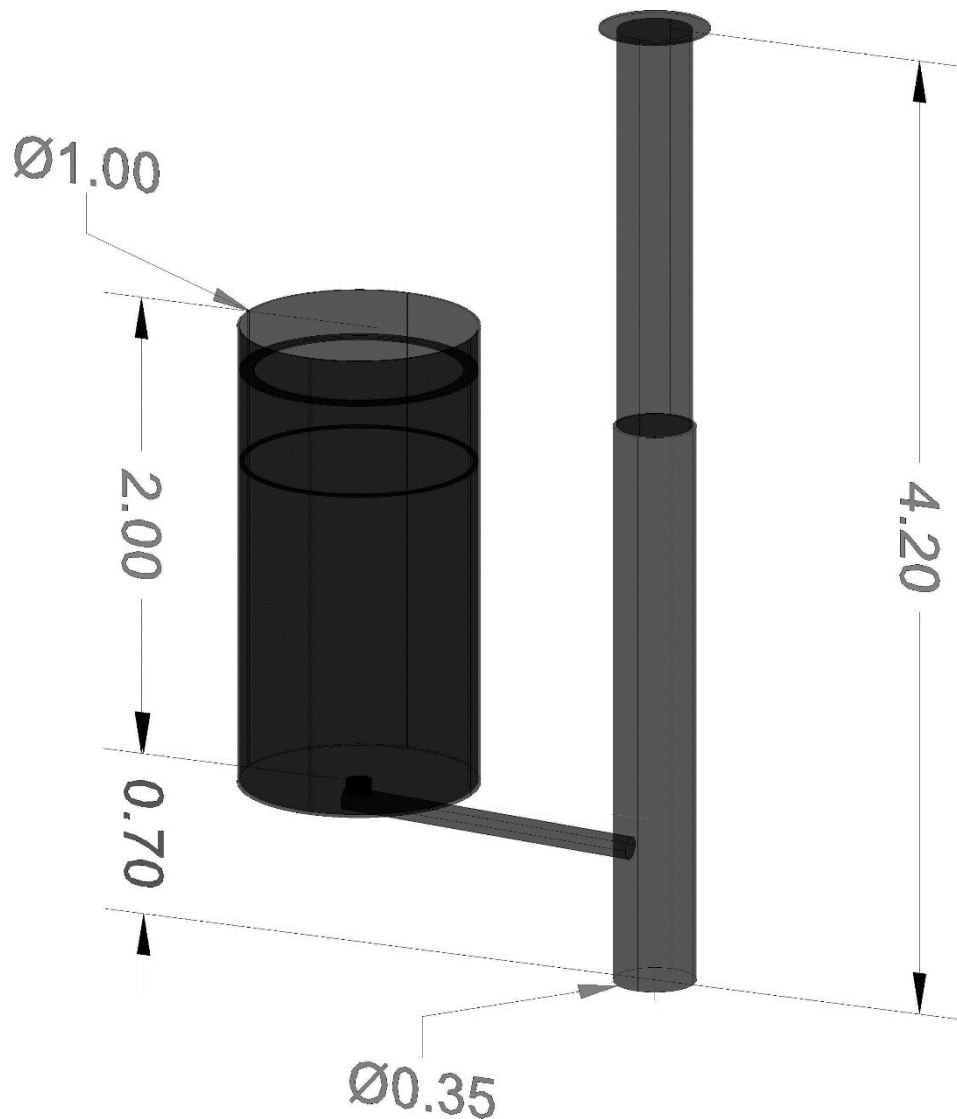
Lysimetriin rakennettavien kaulusten vaikutusta reunavirtaukseen on tutkittu merkkiainekokeilla. Tutkimuksessa havaittiin, että kahdella kauluksella saatiin reunavirtaus minimoitua niin pieneksi, että niitä ei kokeen menetelmin enää huomattu. (Corwin 1999) Tutkimuksen tulokset soveltuvat hyvin tässä työssä käytettyihin lysimetreihin, sillä kyse on vastaavan kokoisista lysimetreistä: tutkimuksen lysimetrit olivat 0,6 m halkaisijaltaan ja 1,83 m korkeudeltaan, kun taas tässä työssä käytetyt lysimetrit ovat metrin halkaisijaltaan ja 2 metriä korkeudeltaan. Tutkimuksessa käytettyjen kauluksien leveyksiä syvyyksiä on skaalattu ylöspäin mittasuhteen muutoksen mukaisesti 3,75 senttimetrinä 5 senttimetriin ja 1,25 senttimetrinä 2 senttimetriin. 5 cm kaulus asennettiin 10 cm maanpinnan alapuolella ja 2 cm kaulus 50 cm maanpinnan alapuolelle. Kauluksien käyttö muuttaa jossain määrin virtausprofiilia luonnollisesta. Lisäksi kahden lysimetrin pinta jätettiin materiaalmäärien vertailtavuuden vuoksi alle kaulusten. Tämä altistaa ne muita enemmän reunavirtauksille.

Tämän työn koerakenteiden suunnittelun pohjana toimivat GTK:n rakentamat lysimetrit, joilla tutkitaan Kevitsan metallikaivoksen sivukiven peittorakenteita (Karlsson ym. 2018). Nämä kaksi metriä korkeat, metrin halkaisijaltaan olevat lysimetrit on asennettu maanpinnalle ja niistä valuva vesi on tarkoitus kerätä 30 litran vesisäiliöihin. GTK:n lysimetrikoe pysähtyy siis todennäköisesti talven ajaksi lysimetrien jäätyessä. Lisäksi pakkasen pääsee tunkeutumaan helpommin koerakenteisiin verrattuna lopullisiin rakenteisiin.

Tässä työssä mitoitetaan GTK:n koejärjestelmää vastaavat lysimetrit upotettiin maahan, jotta myös talven ja roudan vaikutuksia voitaisiin realistisemmin arvioida. Tämän myötä lysimetreihin piti tehdä tarvittavat muutokset ja suunnitella veden keruu sekä näytteenotto. Verrattuna pinnalle asennettuihin lysimetreihin, rakenne on monimutkaisempi lisäten sekä itse lysimetrien, että rakentamisen kustannuksia. Upotus suunniteltiin niin, että reuna jää noin 100 mm korkeudelle maanpinnasta. Koerakenteissa

ei mallinneta pintavaluntaa, vaan vesi joko haihtuu tai suotautuu koekerroksien läpi. Kun sateen rankkuus ylittää haihtumisen ja suotautumisen sekä 100 mm varastokapasiteetin, vesi tulvii yli ja suotautuu koerakenteiden ohitse ympäröivään maaperään. Tämä ei kuitenkaan ole kovin todennäköistä, kuten on esitetty myöhemmin reunuksen vaikutusta mallin avulla tarkasteltaessa.

Veden keräys keruukaivoihin tapahtuu lysimetrin pohjasta 110 millimetrin viemäriputkella sadevesikaivoon. Lysimetrien pohjaan, viemäriputken suun alueelle on porattu 8 mm halkaisijan reikiä veden virtausreitiksi 110 mm reiän sijaan, jotta materiaalien paikallaan pitämiseksi suunniteltu suodatinkangas kestäisi. Lysimetrien rakennetta on havainnollistettu kuvassa 3, jossa näkyy myös 20 cm ja 60 cm etäisyydelle lysimetrin yläreunasta asennetut kaulukset.



Kuva 3. Tässä työssä käytettyjen lysimetrien ja keruukaivojen rakenne ja mitat metreinä

Suodatinkankaan huokoskoko valittiin saatavilla olevan kankaiden mukaan. Korkean luokituksen kankaiden pienien erien saatavuus oli heikkoa. Siksi myös vaihtoehtoisia suodattimia, esimerkiksi paperiteollisuuden viiraa, eli paperimassan kuivattamiseen käytettyä kangasta huokoista kangasta pohdittiin. Työhön kuitenkin valikoitui lopulta N3-käyttöluokan suodatinkangas, jonka merkitsevä huokoskoko O90 oli 0,063 mm. Tätä kangasta testattiin pienemmässä mittakaavassa rikastushiekalla ja ämpäreillä. Testissä verrokkina toimi N1-luokan suodatinkangas, jonka ilmoitettu merkitsevä huokoisuus oli 0,08mm. Kummankaan kankaan tapauksessa rikastushiekan läpi suotautunut vesi ei

silminnähden sisältänyt hienoaainesta, mutta kun ämpäriä täräytti, vedestä näki värjäymää, eli läpi kulkeutunutta ainesta. Värjäymä oli selvästi suurempaa 0,08 mm suodatinkankaalla. Jokaiseen lysimetriin käytettiin lopulta 0,063 mm suodatinkangasta kaksin kerroin keskimääräisen huokoskoon pienentämiseksi edelleen.

Hienoaineksen suuri kulkeutuminen voi aiheuttaa kokeessa kanavoitumista ja siten vedenläpäisevyyksien vääristymistä. Toisaalta kuitenkin pintarakenteet ovat ensimmäiset vettä lävitseen päästävät kerrokset ja materiaalikerrokset ovat melko paksut, joten läpi asti oleva kanavoituminen vaikuttaa epätodennäköiseltä. Lisäksi lysimetrien tiivistämisen eroavaisuudet todelliseen tilanteeseen nähden ovat todennäköisesti suuremmat kuin kulkeutumisen vaikutukset. Hienoaines veden seassa saattaa myös vaikuttaa kemiallisiin reaktioihin, koska viipymäajat muuttuvat. Esimerkiksi, mikäli sadevesikaivoon kulkeutuu rikastushiekkaa, voi hapetusreaktio jatkua edelleen keruukaivossa ja esimerkiksi laskea pH:ta matalammalle.

Tarvittavaa veden keräystilavuutta arvioitiin kuukausikohtaisen keskimääräisen sateen perusteella, sillä tyhjennys suunniteltiin kuukausittaiseksi. Tässä aineistona toimi Tornion Torpin kuukausittaisten sademäärien keskiarvo vuosilta 2003-2010. Suurimmat sademäärät olivat syyskuussa ja marraskuussa, jolloin lysimetri keräisi noin 50 litraa sademäärän ollessa noin 60 mm. Lysimetrin keräämä vesi on maksimitilanne, jossa haihduntaa ei ole. Tähän lisättiin vielä varmuudeksi 20 litraa, eli noin 40% varmistamaan se, että keruukaivon pinnan nouseminen ei häiritse itse lysimetrin virtausolosuhteita nostamalla maakerroksen saturoitunutta pintaa tapauksissa, joissa kuukausisade on suurempi tai tyhjennysväli pidempi. Tarvittavaksi sadeveden tilavuudeksi saatiin näin 70 litraa, jota käytettiin suunnitteluarvona keruukaivon syvyyden ja tilavuuden määrittämiseksi. Useiden muovitehtaiden katalogista löytyvä 350mm sadevesikaivo osoittautui tilavuudeltaan sopivaksi vaatien lysimetrin ja keruukaivon pohjien syvyyseroksi noin 700mm tarvittavan tilavuuden saavuttamiseksi. Sadevesikaivon teleskooppiputki suunniteltiin noin 1500 mm maanpinnan yläpuolelle, jotta talvella kertyvä lumi ei keväällä sulaessaan pääsisi sadevesikaivoihin tyhjennysreittiä pitkin.

Keruukaivot peitettiin kannella vuotojen estämiseksi. Sadevesikaivojen tyhjennys suunniteltiin toteutettavaksi uppopumpulla.

4.3 Lysimetrien reunojen vaikutus kerätyn veden määrään

Ilmatieteenlaitoksen 10 minuutin välein rekisteröimää Torpin sateen intensiteetin dataa käytettiin arvioimaan koerakenteiden 10 cm reunuksen yli virtaavan veden määrän suhdetta koerakenteen keskimääräiseen vedenjohtavuuteen yksinkertaistetun mallin avulla (yhtälö 9).

$$\frac{dS}{dt} = P(t) - I \quad (9)$$

Missä S on vesivaraston muutos,

t on aika,

P(t) on sateen intensiteetti ajanhetkellä t ja

I on keskimääräinen vedenjohtavuus

Mallissa ei huomioida haihduntaa tai saturoitumisasteen vaikutusta vedenjohtavuuteen, eli toisin sanoen vedenjohtavuus oletettiin vakioksi. Diskretisoimalla malli 10 minuutin aikavälille saadaan varastolle ajanhetkellä i (juokseva numero) seuraava yhtälö:

$$S_i = S_{i-1} + P_i \cdot t - I \cdot t \quad (10)$$

Missä S on vesivarasto,

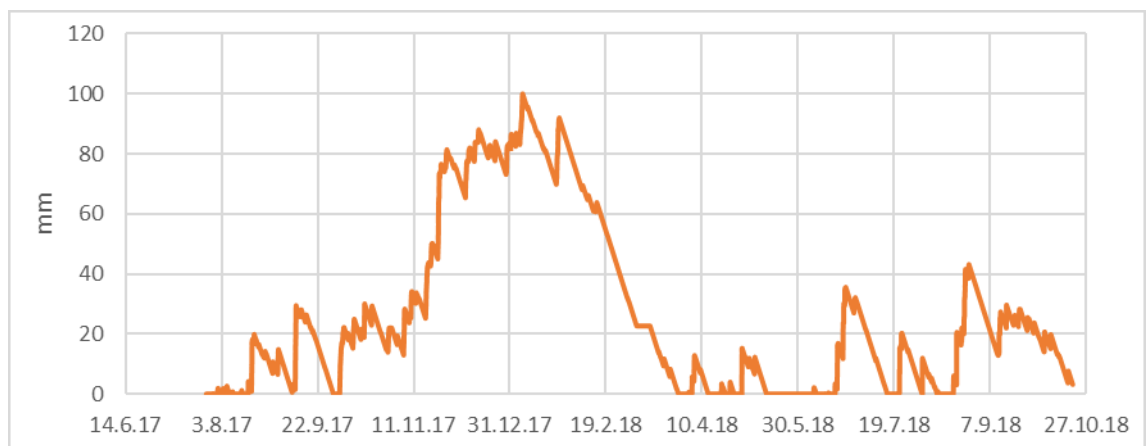
i on kyseisen ajanhetken indeksi

t on mittausväli (10min),

P on sateen intensiteetti ajanhetkellä i ja

I vedenjohtavuus

Asettamalla ehto $S_i \geq 0$ pidetään varasto positiivisena, kun vedenjohtavuus ylittää sadannan ja varaston sen hetkisen summan. Käyttämällä 10 minuutin välein mitattua sadannan intensiteettiä, voidaan peilata keskimääräisen vedenjohtavuuden vaikutusta ylivirtaavaan vesimäärään. Haarukoimalla vedenjohtavuuden arvoa voidaan löytää sellainen arvo, jonka kanssa varasto on mahdollisimman lähellä 100 millimetriä. Tämä vastaa tilannetta, missä vedenpinta on lysimetriä 10 cm reunuksen yläpinnassa. Näin saadaan koko koejakson aikainen sadedata huomioiden vedenjohtavuuden raja-arvoksi $2,34 \cdot 10^{-8}$ m/s (varaston maksimi arvo tällöin $>99,9$ mm). Mallin mukainen varaston reagointi sadedataan on esitetty kuvassa 4. Tästä huomataan, että koko sadedata huomioiden, kriittiset sadannat tapahtuvat talvella lumikerroksen aikaan. Lisäksi vettä olisi pitänyt olla näkyvissä lysimetrin pinnalla aikaväleillä 19.6-18.7.2018 ja 18.8.-19.10.2018. Tätä ei kuitenkaan havaittu.



Kuva 4. Mallin mukainen varaston reagoiminen sadedataan vedenjohtavuudella $2,34 \cdot 10^{-8}$ m/s

Mikäli keskitytään sulan maan aikana tapahtuneeseen sadantaan eli ajanjaksolle 1.5.2018-27.10.2018, saadaan vedenjohtavuuden raja-arvoksi $1,225 \cdot 10^{-8}$ m/s (varaston maksimi arvo tällöin $>99,9$ mm). Varaston käyttäytyminen on esitetty kuvassa 5. Sen mukaisesti lysimetriä pinnalla olisi pitänyt jäädä vesikerros koko kesäksi alkaen kesäkuusta, mitä ei havaittu kentällä yhdessäkään lysimetrissä.



Kuva 5. Mallin mukainen varaston reagoiminen sadedataan 1.5. alkaen vedenjohtavuudella $1,225 \cdot 10^{-8}$ m/s

Laboratoriotesteissä saadut saturoituneet vedenjohtavuudet ylittivät kaikilla materiaaleilla mallin mukaan saadun vedenjohtavuuden raja-arvon $2,34 \cdot 10^{-8}$ m/s. Kokeen aikana ei myöskään havaittu vesikerroksen pysymistä materiaalikerrosten päällä pidempiä aikoja. Mallissa ei huomioitu haihduntaa, mikä suurentaisi entisestään varastosta poistuvan veden määrää. Vaikuttaa siis siltä, että vettä ei todennäköisesti päässyt juurikaan 10 cm reunuksen yli vaan vesi joko haihtui tai suotautui.

4.4 Lysimetrien rakentaminen

Lysimetrit tilattiin tilauskaivoja tekevältä Pipe Life:n muovitehtaalta, tehdyn suunnitelman pohjalta. Kuuden lysimetrin upotus kesti noin neljä työpäivää kaivinkonekuljettajalta ja lapiomieheltä. Ennen tätä lysimetrejä varten tehty kaivantoa oli valmisteltu kaivinkoneella työpäivän verran. Keruukaivot asennettiin kaivannon pohjalle. Lysimetrit asennettiin vesivaa'an ja tasolaserin avulla suoraan ja toiseen tasoon. Kuvassa 6. näkyy keruukaivot paikoillaan, lysimetrin siirto kaivantoon ja asentamista varten valmisteltu taso. Upotuksen täyttöön käytettiin routimattomia kiviaineksia lysimetrien

liikkumisen aiheuttamisten vuotojen estämiseksi. Täyttöaineiksina olivat esimerkiksi 5-15 millimetrin raekokojakauman dolomiitti ja kvartsi. Kerrokset tiivistettiin tärylätkällä.



Kuva 6. Lysimetrin nostaminen kaivantoon niille routimattomista materiaaleista rakennetun tiivistetyn tason päälle (Kuva: Kinnunen J. 2017)

Lysimetrit täytettiin tutkittavilla materiaaleilla. Pohjalle tullut rikastushiekka tiivistettiin vain käsin, kävelemällä sen päällä ja lyömällä kuvassa 7 esitetyllä, vanhasta silitysraudasta valmistetulla työkalulla reunat tiiviiksi. Rikastushiekka vaikutti tiivistyvän hyvin. Käsityökaluilla tehdyn rikastushiekan tiivistämisen oli tarkoitus kuvata mahdollisesti heikommin tiivistyvää rikastushiekkapatjaa todellisessa peitossa.

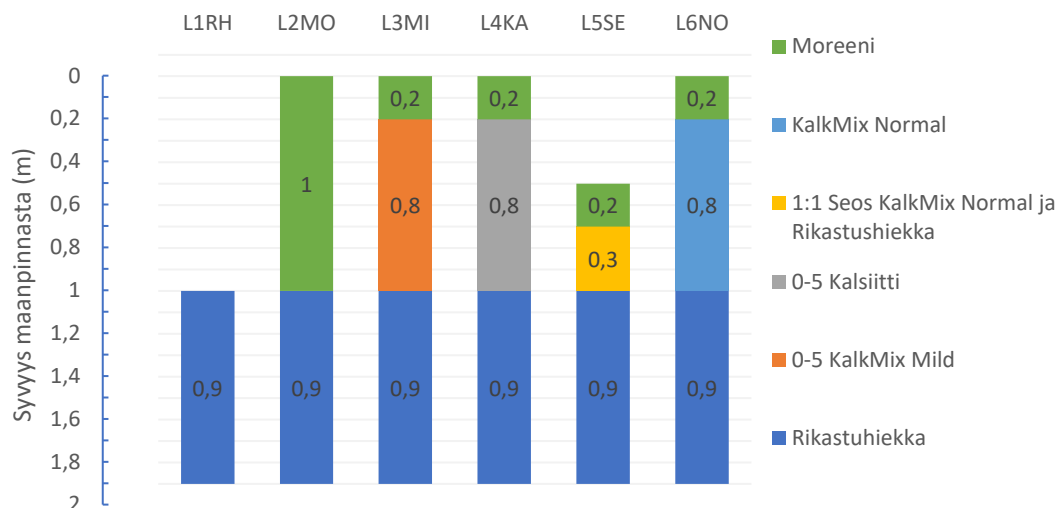
Täyttöä jatkettiin lisäämällä seuraavia kerroksia noin 20-30cm kerralla ja tiivistämällä pyöreäpohjaisella 45 cm halkaisijalla olevalla 88kg:n tärylätkällä (kuva 7), mikäli materiaali sen mahdollisti. Kalkmix Normal ei tiivistynyt liiallisen kosteuden takia, vaan täräsi paikallaan ja pursottaen materiaalia altaan. Niinpä tiivistys kerroksille Kalkmix Normal ja 50:50 Kalkmix Normal-rikastushiekka tehtiin käsityökalulla ja polkien. Täyttökerroksia on havainnollistettu kuvassa 8. Lisäksi on esitetty kerrosten syvyys suhteessa maanpintaan ja lysimetreistä myöhemmin käytettävät lyhenteet.



Kuva 7. Lysimetrien kerrosten reunojen tiivistämiseen rakennettu käsityökalu ja tiivistämiseen käytetty pieni tärylätkä (Kuva: Kinnunen J. 2017)

Täyttökerrokset lysimetreissä olivat seuraavat:

- L1RH: 0,9 m rikastushiekkaa
- L2MO: 0,9 m rikastushiekkaa, 1 m moreenia
- L3MI: 0,9 m rikastushiekkaa, 0,8 m 0-5 Kalkmix Mild, 0,2 m
- L4KA: 0,9 m rikastushiekkaa, 0,8 m 0-5 kalsiitti, 0,2m moreenia
- L5SE: 0,9 m rikastushiekkaa, 0,15 m Kalkmix Normalia ja 0,15 m rikastushiekkaa sekoitettuna lapiolla, 0,2 m moreenia
- L6NO: 0,9 m rikastushiekkaa, 0,8m Kalkmix Normal, 0,2m moreenia.



Kuva 8. Lysimetreistä käytetyt lyhenteet, täyttömateriaalit ja kerrospaksuudet metreinä

Ensimmäisen lysimetrin (L1RH) 0,9 metrin paksuinen rikastushiekka ilman peittorakennetta toimii verrokkina peittorakenteellisille lysimetreille. Toinen lysimetri (L2MO) edustaa Pyhäsalmen kaivoksen vuoden 2007 ympäristöluvassa kuvatus suunnitelman mukaista moreenipeitteistä rakennetta ja toimii siten vertailupohjana kalkkituotteita sisältävien rakenteiden toimivuudelle. Se koostuu 900 mm:n kerroksesta rikastushiekkaa ja 1000 mm:n kerroksesta hienoaainesmoreenia. Rakenteen tavoitteena on rajoittaa hapen kulkeutumista pidättämällä vettä. Hapen diffuusio vedessä on huomattavasti hitaampaa kuin ilmassa ja hapen huonompi saatavuus hapettumisreaktioihin rajoittaa sulfidihapettumista. Tämä pitää pH:n korkeammalla ja rajoittaa myös metallien liukenemista veteen. Lisäksi veden suotautumista hidastava rakenne vähentää myös veden muodostumista helpottaen mahdollista käsittelyä.

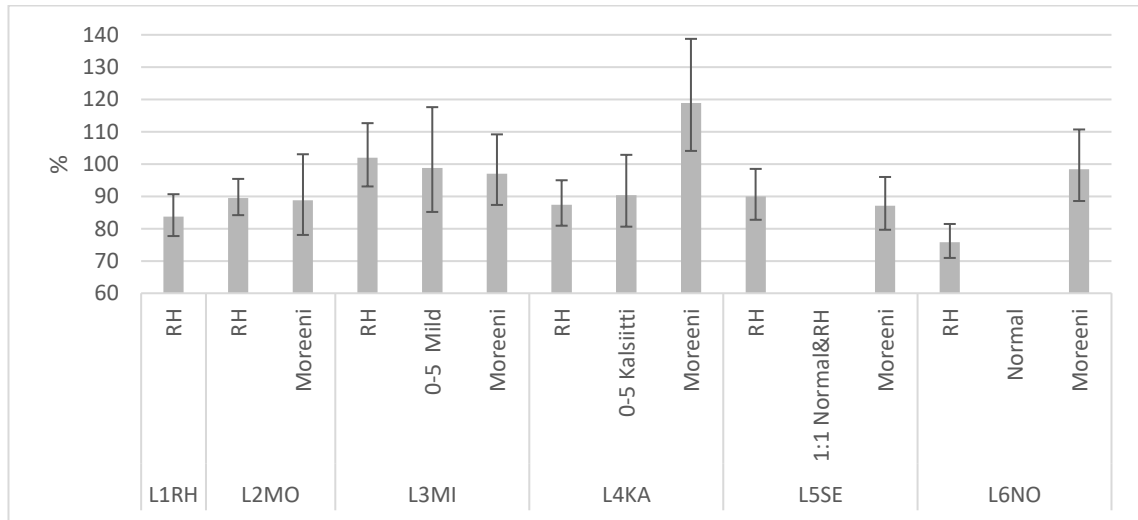
Lysimetreissä L3MI, L4KA ja L6NO testataan Kalkmix Mildiä, kalsiittia ja Kalkmix Normalia samanlaisessa peitossa, jossa kerroksina on 0,9m rikastushiekkaa 0,8m kalkkituotetta ja 0,2m kasvukerrosmoreenia. Alitekalsiitin ABA-testissä määritetyt neutralointikapasiteetit olivat suuremmat kuin Kalkmix Mildillä, mutta sen hienoaainespitoisuus on vastaavasti pienempi suodatinpölyn puuttuessa. Eroja mitatussa vedenjohtavuudessa ei kuitenkaan juuri ollut. Luonnonmateriaali kalsiitin ja Kalkmix Mildin vertailu on mielenkiintoista myös liukenevien haitta-ainepitoisuuksien osalta.

Kalkmix Normalin koerakenteesta saadaan tietoa siitä, onko poltetun kalkin suuremmasta reaktiivisuudesta hyötyä peittorakenteessa.

Lysimetrissä L5SE tutkittavalla rakenteella pyrittiin lisäämään Kalkmix Normalin kontaktia rikastushiekan kanssa sekoittamalla sitä rikastushiekkaan. Tämä voisi mahdollisesti vähentää materiaalitarvetta ja parantaa neutralointia sekä veden laatua. Rakennettaessa pintarakennetta materiaalien sekoittaminen lisää kuitenkin kustannuksia merkittävästi. Eräs sekoitusmenetelmä olisi kyntäminen. Syväkyntöä on pintamateriaalien sekoituksessa käytetty jopa metriin asti (Davis ym. 1999), mutta diplomityöpalavereissa todettiin realistisemman syvyyden olevan luokkaa 30 cm. Tämä toteutettaisiin kerrostamalla 15 cm Kalkmix Normalia rikastushiekan päälle ja kyntämällä 30 cm syvyydelle. Lysimetrikokeessa rakennetta kuvaa 30 cm paksuinen 1:1 sekoitus Kalkmix Normalia ja rikastushiekkaa lapiolla sekoitettuna. Tämä on peitetty 20 cm kasvukerroksella moreenia. Rakenteen mahdollisen heikkoutena suurempien kulujen lisäksi on juuri reaktiivisen materiaalin vähyys suhteessa rikastushiekkaan. Tämä toisaalta pienentää materiaalin logistisia kustannuksia.

Täytön edetessä jokaisesta kerroksesta otettiin näyte kaivamalla kerroksen pintaan kuoppa ja ottamalla irrotettu aines talteen ilmatiivisti suljettavaan muovipussiin. Kuoppa peitettiin muovilla ja siihen kaadettiin mitallisesta astiasta vettä, kunnes vesi saavutti kuopan reunan. Kaadettu vesitilavuus otettiin ylös. Mittauksissa päästiin todennäköisesti noin desilitran tarkkuuteen. Virheitä aiheuttivat esimerkiksi kuopan reunojen arvioiminen, ja kaiken maa-aineksen saaminen näytepussiin. Myöhemmin näytteet punnittiin ja kuivattiin uunissa vesipitoisuuden saamiseksi. Näitä tietoja käytettiin tiivistymisasteen arvioimisessa Proctor-testin tulosten kanssa (Proctor-kokeen, seulontojen ja vedenjohtavuuden tulokset on esitetty liitteessä 4. Kuvassa 9. esitetään rakentaessa saavutetut tiivistysasteet kerroksittain kaikille lysimetreille. Proctor-koetta ei saatu laboratoriossa teetettyä Kalkmix Normalille sen reaktiivisuuden vuoksi ja se puuttuu kuvasta.

Koerakenteita tehtäessä saavutettiin melko suuret tiivistysasteet. Vastaavien tiivistysasteiden saaminen suuressa mittakaavassa saattaa olla vaikeaa konsolidoituvan rikastushiekan päällä. Moreenin korkea tiivistysaste suhteessa Proctor-testeihin saattaa selittyä kivillä (yli <16 mm), jotka on poistettu Proctor-testien tiheyksistä.



Kuva 9. Lysimetrien kerrosten tiivistysasteet ja tilavuusmittauksen pohjalta arvioidun mahdollisen virheen rajat (RH=rikastushiekka)

4.5 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus koostui koerakentamisen jälkeisestä seurannasta, johon kuuluivat kenttämittaukset ja veden laboratoriokokeet, sekä materiaaleille teetetyn geotekniset testit. Tuloksia käsiteltiin Excel-tilukko-ohjelmalla ja R-studio ohjelmistolla. Pääosin tulosten käsittely oli datan muokkaamista graafisesti esitettävään muotoon. Eri aineiden pitoisuuksille laskettiin korrelaatioita, yhtälön 11 mukaisesti (Microsoft 2019):

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Missä r on korrelaatiokerroin,

x on ensimmäinen analysoitu parametri,

y on toinen analysoitu parametri,
 \bar{x} on ensimmäisen parametrin keskiarvo ja
 \bar{y} on toisen parametrin keskiarvo.

Työ alkoi kenttämittauksilla välittömästi, kun lysimetrien keräukaivoissa havaittiin vettä joulukuussa, kun koe oli ollut käynnissä noin 4kk. Vesinäytteistä ensimmäiset otettiin, kun koe oli ollut käynnissä noin 7kk. Ennen ensimmäistä näytteenottokertaa lysimetrien keräukaivoja ei tyhjennetty. Materiaaleille teetettiin parannettu Proctor-koe, seulonta laajennettuna hydrometrikokeella ja vedenjohtavuuden testaus. Kuvaukset geoteknisiin testeihin käytetyistä menetelmistä on esitetty liitteessä 4.

4.5.1 Kenttämittaukset

Kenttämittauksia suoritettiin suotautuneesta vedestä paikan päällä YSI Pro Plus -kenttämittarilla. Mitattuja suureita olivat veden syvyys, lämpötila, ilmanpaine, liuennut happi, sähkönjohtavuus, pH ja redox-potentiaali. Lisäksi mitattiin vesimäärää pinnankorkeuksia arvioimalla ja tyhjennysten yhteydessä tarkemmin. Kenttämittarin kalibrointi tarkistettiin ennen mittauksia ja mittari kalibroitiin tarvittaessa.

Veden syvyydestä voidaan päätellä kertynyt vesimäärä. Kun tämä tieto yhdistetään alueen hydrologisiin tietoihin, voidaan kerrosten vaikutusta veden suotautumiseen arvioida. Lisäksi voidaan muuttaa konsentraatiot kokonaismassaksi olettamalla vesi homogeeniseksi mittauksen suhteen. Työssä käytettiin Ilmatieteen laitoksen avointa dataa Tornion Torpin säähavainnoista. Torppi sijaitsee noin 17 kilometrin päässä koerakenteista. Lysimetrit sijaitsevat vierekkäin samalla alueella, joten veden kertymisen lysimetrien välillä voidaan pitää vertailukelpoisena ilman ympäristöstä johtuvia eroja. Eroavaisuudet veden suotautumisessa kertovat siis suoraan eroista lysimetreissä. Veden syvyyttä alettiin mitata säännöllisesti vasta syksyllä 2018, sillä alkuperäinen suunnitelma oli seurata veden määrää tyhjennysten yhteydessä. Veden suotautuminen oli kuitenkin niin hidasta, että tyhjennyksen intervalli muodostui melko pitkä. Lisäksi veden

tyhjennystä ei haluttu aloittaa ennen ensimmäisten vesinäytteiden ottoa, joten syvyyden mittaaminen toi kaivattua lisätietoa veden määrästä.

Lämpötila ja ilmapaine ovat apusuureita, joita kenttämittari käyttää esimerkiksi liuenneen hapen mittaamiseen. Nämä otettiin ylös, jotta tuloksia voitaisiin tarkastella myös apusuureiden suhteen, mikäli esimerkiksi kalibroinnissa ja mittauksessa näkyisi selviä anomalioita tai virheitä. Apusuureiden avulla nämä olisi mahdollista eliminoida datasta. Sähköjohtavuuden muutosten avulla voidaan seurata ionien määrää vedessä. Tämä on verrannollinen liuenneisiin aineisiin. Happamuutta kuvaava pH mittaa vetyionien määrää.

Liennut happi kuvaa veden happipitoisuutta ja on merkittävä tekijä hapetusreaktoiden saatavilla olevan hapen kannalta. Liennutta happea voidaan mitata milligrammoina litrassa, tai hapen kyllästysasteena, eli kuinka paljon vesi sisältää happea suhteessa veden maksimihappipitoisuuteen. Koska veden maksimihappipitoisuus vaihtelee lämpötilan mukaan, otetaan kyllästysasteen mittauksessa huomioon myös lämpötila. Suotautunut vesi kerääntyy sadevesikaivoon, jossa on melko suuri ilmatilavuus. Kaivon kansi ei ole kaasutiivis, mutta vaikuttaa hidastavan kaasujen virtausta merkittävästi, sillä eroja happipitoisuuksissa lysimetrien välillä oli havaittavissa. Lisäksi kaivo on melko syvä, joten ilma todennäköisesti muodostuu seisovaksi hidastaen hieman aineen vaihduntaa ilman ja veden välillä. On kuitenkin perusteltua olettaa, että reaktiot jatkuvat jossain määrin sadevesikaivossa ja eivät siten kuvaa täydellisesti huokosveden tilannetta.

Redox-potentiaali (hapetuspelkistyspotentiaali, tai ORP Oxygen-reduction-potential) kuvaa systeemin hapetus tai pelkistys -kykyä. (Søndergaard 2009) Positiivinen (korkea) redox-potentiaali kertoo, että vedessä on hapettavat olosuhteet ja matala puolestaan viittaa pelkistäviin olosuhteisiin. OPR-mittauksien ja Fe(III)/Fe(II) -aktiivisuussuhteen välillä on usein vahva korrelaatio (Nordstrom & Alpers 1999a).

Hapetuspelkistyspotentiaalia mitattaessa Standardi referenssielektrodina toimii vetyelektrodi, jonka potentiaalieroa platinaelektrodiin mitataan. Platinaelektrodi on suoraan kontaktissa mitattavan liuoksen kanssa ja on yhdistettynä referenssielektrodiin

suolasillalla (yleensä Suolahappo). Vetyelektrodin epäkäytännöllisyyden takia kentällä mitattu redox-potentiaali referenssielektrodina on yleensä hopea-hopeakloridielektrodi. Näin saatava potentiaali on muunnettavissa standardi-vetyelektrodin ja platinaelektrodin välille mitattuun potentiaaliin muuttamalla referenssitaso. Muutos saadaan vertaamalla käytetyn elektrodin (Ag-AgCl) potentiaalia vetyelektrodin potentiaaliin ja lisäämällä erotus. (Striggow 2013) Elektronipotentiaalin (eH) ja pH:n avulla voidaan määrittää hapetuspelkistysreaktioiden tasapainotiloja kuvaavia nk. Pourbaix -diagrammeja. Niiden käyttö kenttäolosuhteiden perusteella mitattujen suureiden kanssa on kuitenkin kyseenalaista, koska matalissa lämpötiloissa ja monimutkaisissa systeemeissä iso osa hapetuspelkistysreaktioista ei ole saavuttanut tasapainotilaansa.

Lämpötila vaikuttaa ORP-mittauksiin. Se otetaan huomioon kalibroinnissa, mutta kentällä eri liukoisten aineiden hapetus-pelkistys käyttäytyminen muuttuu eri tavalla lämpötilan suhteen ja aiheuttaa siten lämpötilasta johtuvaa varianssia, jota ei voida laskennallisesti poistaa. Kuitenkaan yli 100mV muutokset eivät todennäköisesti johdu lämpötilasta. Lisäksi sensorin kontaminaatio voi hidastaa sen responsiivisuutta. (YSI 2001) Tässä työssä lämpötilan vaikutus ORP-mittauksiin on merkittävin tarkasteltaessa aikasarjoja ja niissä tapahtuvia muutoksia. Yhdellä mittauskierroksella lysimetreihin kerätyn veden lämpötila on hyvin lähellä toisiaan ja siten ORP-arvojen perusteella voi tehdä vertailua lysimetrien kesken. Tämän työn yhteydessä käytetty kenttämittari käyttää hopea-hopeakloridielektrodia, jossa suolasiltana on 4 molaarista suolahappoa.

4.5.2 Laboratoriokokeet

Vesistä otettiin näytteet 7.3.2018, 14.6.2018, 10.9.2018 ja 10.12.2018. Vesinäytteenottoon käytettiin bailer-noutimia, (kuva 10) ja näytteenoton yhteydessä suoritettuun veden syvyyden mittaukseen käytettiin elektronisella anturilla varustettua mittaa (kuva 11).



Kuva 10. Vesinäytteenotossa käytetty bailer-noudin (Kuva: Eurofins Ahma Oy 2018)



Kuva 11. Näytteenoton yhteydessä suoritettujen vedenkorkeusmittauksiin käytetty mittanauha elektronisella anturilla (Kuva: Eurofins Ahma Oy 2018)

Vesinäytteistä analysoitiin laboratoriossa:

- alkuaineiden liukoisia pitoisuuksia, (As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, S, Si, Sr, Zn)
- kloridi,
- fluoridi,
- Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC),
- epäorgaanisen hiilen kokonaismäärä (TIC)
- liennut orgaaninen hiili (DOC)
- Kahdenarvoinen rauta (Fe(II))
- pH, redox ja sähkönjohtavuus

Alkuaineiden liukoisia pitoisuuksia varten näytteet suodatettiin 0,45 µm suodattimella ennen analyysia. Lisäksi alkuaineanalyysiin käytetyt näytteet kestävästi typpihapolla. TOC näyte puolestaan kestävästi suolahapolla ja DOC näyte suodatettiin 0,45 µm suodattimella ja kestävästi suolahapolla. Kahdenarvoisen raudan analyysiä varten näyte suodatettiin 0,45 µm suodattimella ja kestävästi rikkihapolla. Laboratorioanalyysiin kuului myös pH, fluoridi, kloridi, sähkönjohtavuus, redox-potentiaali ja epäorgaaninen hiili, joita varten ei näytteitä kestävästi tai suodatettu. Standardit joihin laboratorioanalyysit perustuvat, sekä analyysien mittausepävarmuudet ja määritysrajat on esitetty liitteessä 1.

5 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

5.1 Materiaaleille teetettyjen testien tulokset

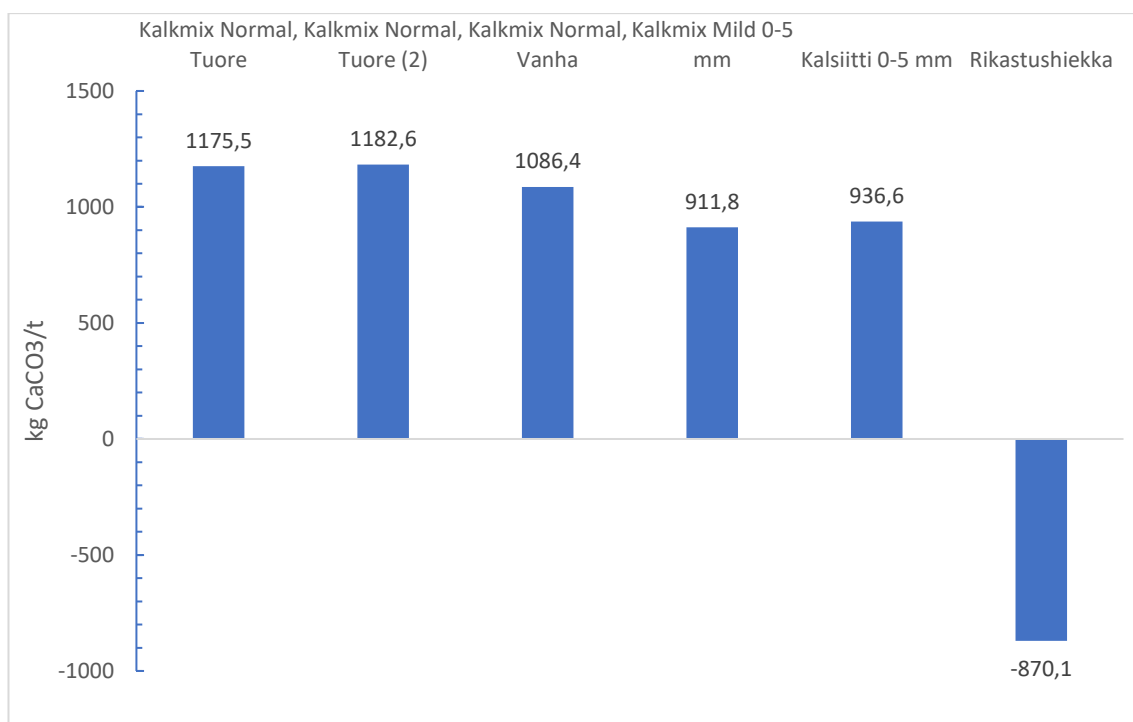
Materiaaleille teetetyn parannetun Proctor-kokeen, seulonnan ja hydrometrikokeen sekä vedenjohtavuuden testauksen tulokset on esitetty liitteessä 4. Koonti tuloksista on esitetty taulukossa 2. Kalkmix Normalille näitä kokeita ei saatu teetettyä uunikuivauksessa syntyvän lipeän hajun vuoksi. Normalin vedenjohtavuus on kuitenkin ollut GTK:n teettämissä testeissä $3,5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Karlsson ym. 2018). Tämä on samaa luokkaa rikastushiekan tulosten kanssa. Moreeni puolestaan ostettiin tavarantoimittajalta hienoaainesmoreenina, jolle oli testien perusteella saatu vedenjohtavuuden keskiarvoksi $1,52 \cdot 10^{-9}$ m/s. Myöhemmin noin vuoden seisonesta jäännöskasasta otettiin näyte, joka testattiin muiden materiaalien kanssa, ja vedenjohtavuudeksi saatiin kaksi kertaluokkaa suurempia vedenjohtavuuksia. On mahdollista, että osa näytteen hienoaineesta oli huuhtoutunut, eikä näyte kuvaa hyvin koko moreenia.

Taulukko 2. Koonti diplomityön koerakenteissa käytettyjen materiaalien geoteknisten testien tuloksista

Materiaali	Vastaava luonnon maalaji	Maksimi kuivatilavuus paino [kN/m ³]	Optimi-vesipitoisuus [%]	Veden-johtavuus (keskiarvo) [m/s]	Veden-johtavuus (mediaani) [m/s]
Kalkmix Mild	siHkMr	21,4	7,8	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$4,23 \cdot 10^{-7}$
Kalsiitti 0-5	HkMr	22,3	5,4	$3,79 \cdot 10^{-7}$	$3,97 \cdot 10^{-7}$
Moreeni	HkMr	21,6	6,1	$1,94 \cdot 10^{-7}$	$1,96 \cdot 10^{-7}$
Rikastushiekka	siHk	24,5	8,2	$3,59 \cdot 10^{-8}$	$3,58 \cdot 10^{-8}$

ABA-testit teetettiin sivutuotteille ja rikastushiekalle kokonaishapontuoton ja kokonaisneutralointikyvyn arvioimiseksi. ABA-testien tulokset on esitetty liitteessä 5.

Tulosten perusteella lasketut NNP -arvot on esitetty kuvassa 12. Kalkmix Normal-materiaalia testattiin sekä tuoreemmasta että vanhemmasta varastoalueen osasta. Testin perusteella neutralointikyvyn lievää laimenemista oli havaittavissa kauemmin varastoidussa näytteessä. NNP-arvon perusteella on nähtävissä, että koko rikastushiekan hapontuottopotentialin neutraloimiseksi tonniin rikastushiekkaa olisi sekoitettava lähes tonni kalkkituotetta riippumatta tuotteesta.



Kuva 12. ABA-testin tuloksen perusteella määritetyt nettoneutralointipotentiaalit työn rakenteissa testatuille kalkkituotteille ja rikastushiekalle

ABA-testien perusteella rikastushiekan neutralointipotentiaali 12,9 kg CaCO₃/t. Se on todennäköisesti peräisin sekä alkalisista mineraaleista rikastushiekassa että rikastushiekan neutralointiin käytetystä kalkista. Nettoneutralointipotentiaalien perusteella vastaava neutralointipotentiaali on esimerkiksi 14,2 kilolla Kalkmix Mild-materiaalia. Tämän ja lysimetrikokeessa saatujen kuivatiheyksien perusteella esimerkiksi 8 metriä paksun rikastushiekkapatjan neutralointipotentiaalin kaksinkertaistamiseen tarvittaisiin vain noin 11,5 cm kerros materiaalia Kalkmix Mild.

5.2 Lysimetrien vedenläpäisevyys ja kerätyn veden määrä

Työn koejärjestelyssä ei suoraan mitattu sadeveden määrää vaan käytettiin koealueen sijaintia lähimmän Ilmatieteenlaitoksen havaintopaikan, Tornion Torpin sade- ja lumensyvyystietoja. Kun arvioidaan sadeveden ja suotautuneen veden suhdetta, täytyy huomioida koejärjestelyn vaikutukset. Tärkeimpiä eroja todelliseen tilanteeseen ovat:

- 10 cm reunus maanpinnan yläpuolella, joka pitää satavan veden paikallaan poistaen pintavalunnan, mutta päästää osan rankan sateen valunnasta virtaamaan ylitse. Tästä poikkeuksena ovat pelkkä rikastushiekka ja seospeitto, joissa kerroksen ylin pinta on maanpinnan alapuolella,
- vapaa virtaus lysimetrien pohjalta, joka kuivattaa rakenteita lisäten todennäköisesti läpivirtausta.

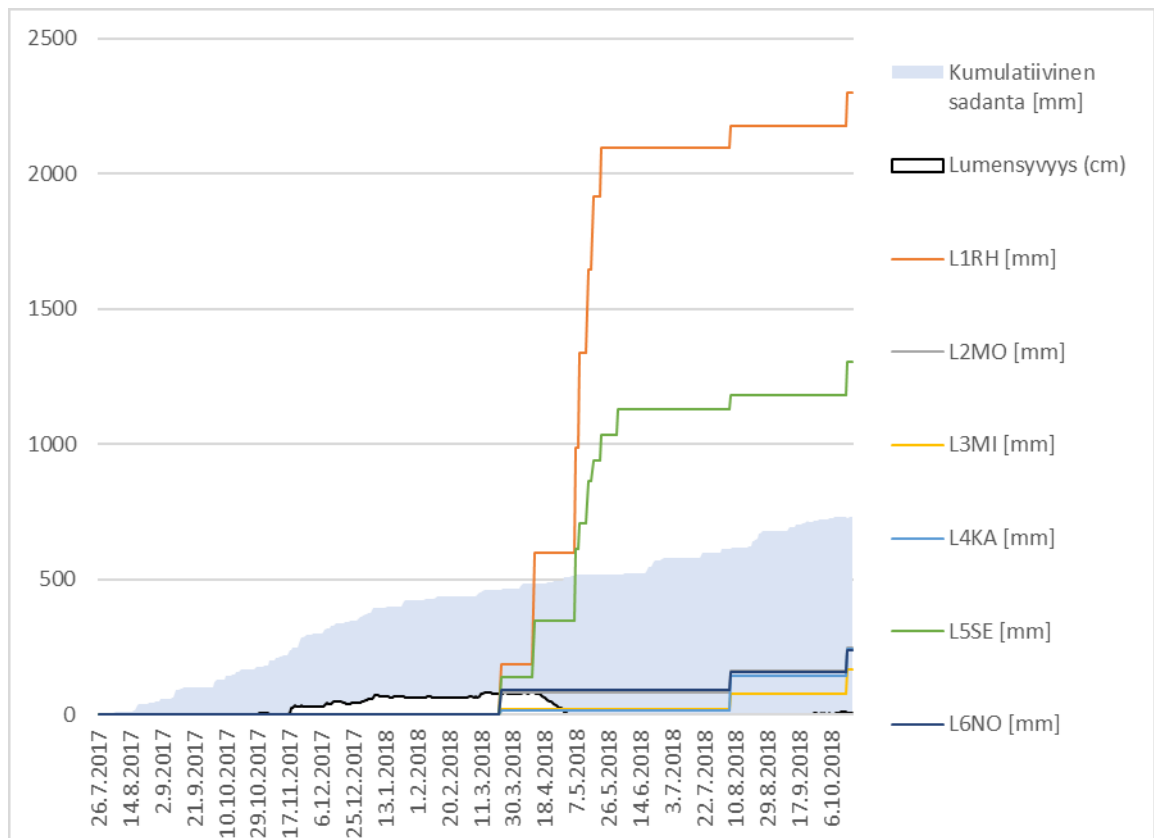
Lisäksi oletuksena on:

- Veden vähäinen haihtuminen kannellisista keruukaivoista.

Kokeen aikana ei ehtinyt myöskään kasvaa merkittävää kasvillisuutta kasvukerrokseen. Kasvillisuus lisää kokonaishaihduntaa vähentäen siten myös suotautuvan veden määrää. Toisaalta juuristo voi läpäistä veden kulkeutumisen estämiseen suunnitellun vettä huonosti läpäisevän peiton aiheuttaen siten lisääntyntä suotautumista.

Kuvassa 13. on esitetty kokeen aikana lysimetrien keruukaivoista tyhjennetty vesimäärä suhteessa kumulatiiviseen sademäärään. Lumensyvyys on esitetty, jotta lumipeiton ajanjaksoa voi arvioida. Selkeästi erottuvat peittämätön lysimetrit L1RH ja L5SE, joista on suurten piikkien ajankohdan perusteella tyhjennetty runsaasti sulamisvettä. Molemmissa tapauksissa tyhjennetty vesimäärä ylittää reilusti kumulatiivisen sademäärän, mikä selittynee sillä, että matalamman pinnan takia nämä kaksi lysimetriä keräsivät sulamisvesiä huomattavasti laajemmalta alueelta. Vaikka 10 cm reunus estää kesällä pintavirtauksen lysimetrien ulkopuolelta lysimetreihin, lumikerros on luultavasti

mahdollistanut tämän sulannan aikana. Lisäksi talven aikana lumi on saattanut pakkautua lysimetreihin, joissa ylin peittokerros on maanpinnan alapuolella. Kokeen aikana lysimetreistä L2MO, L6NO ja L4KA tyhjennetty vesimäärä on samaa luokkaa. Lysimetristä L3MI vettä on tyhjennetty vähiten, mutta ero muihin lysimetreihin on pysynyt lähes ensimmäisestä tyhjennyksestä asti. Tämä viittaa siihen, että ero johtuu eroista materiaalien vettymisessä kokeen alkaessa.



Kuva 13. Lysimetreistä kokeen aikana tyhjennetty vesimäärä, Tornion Torpin havaintoaseman kumulatiivinen sadanta ja lumensyvyys

Nesteen ja kiintoaineksen suhteella on metallien huuhtoutumisessa merkittävä rooli (Al-Abed ym. 2008). Tästä suhteesta käytetään myös suomeksi nimitystä L/S-suhte, (engl. Liquid/solid ratio, L/S-ratio) (Joutti ym. 2006). Esimerkiksi kaivosjätteestä huuhtoutuneen arseenin ja seleenin huuhtoutumisen on havaittu kasvavan L/S-suhteen kasvaessa (Al-Abed ym. 2008). Jatkuvan kokeen L/S-suhteen arviointi on haasteellista verrattuna panostyyppisesti tehtyihin kokeisiin. Kerätyn veden määrän perusteella

voidaan kuitenkin arvioida karkeasti koko kokeen aikaista keskimääräistä L/S-suhdetta käyttämällä kerrosten kuivatilavuuspainojen avulla laskettuja massoja (taulukko 3). Noin 2,2 vuoden kokeen aikana L/S suhteet ovat vielä melko matalia verrattuna esimerkiksi kaatopaikkakelpoisuuden testaukseen käytettävään L/S-suhteeseen 10. Tämän suhteen saavuttamiseen kuluisi rakenteilta, joiden peittopinta on maanpinnan tasalta keskimäärin yli 370 vuotta, mikäli veden suotautuminen jatkuisi kokeissa tähän mennessä havaittua nopeutta.

Taulukko 3. Lysimetrien täytön kokonaiskuivamassa, välillä 26.7.2017-7.10.2019 suotaunut vesi ja lasketut L/S-suhteet.

Lysimetri	Lysimetrin kokonaiskuivamassa [kg]	täytön Suotaunut vesi [l]	L/S Suhde [l/kg]
L1RH	1449	1806	1,25
L2MO	3070	193	0,06
L3MI	3426	131	0,04
L4KA	3187	189	0,06
L5SE	2236	1025	0,46
L6NO	2281	186	0,08

Jokaisen lysimetrin pinnalle voidaan olettaa päätyneen saman määrän vettä, pois lukien edellä mainitut lumen sulannan aiheuttamat ylivirtaukset lysimetreihin, joiden peittopinta oli maanpinnan alapuolella. Erot lysimetrien välillä aiheutuvat siis pääosin toteutuneesta haihdunnasta. Potentiaalinen eli mm. auringon säteilyn ja tuulen nopeuden perusteella arvioitava haihdunta voidaan lysimetrien välillä olettaa yhdenmukaiseksi lysimetrien läheisyyden perusteella. Poikkeuksena lysimetreissä L1RH ja L5SE potentiaalista haihduntaa vähentää maanpintaa matalampi pinta, joka esimerkiksi estää haihtuneen veden kulkeutumista tuulen mukana. Lisäksi säteilyn määrä kerroksen pinnassa on pienempi, koska auringonpaiste ei osu siihen suoraan.

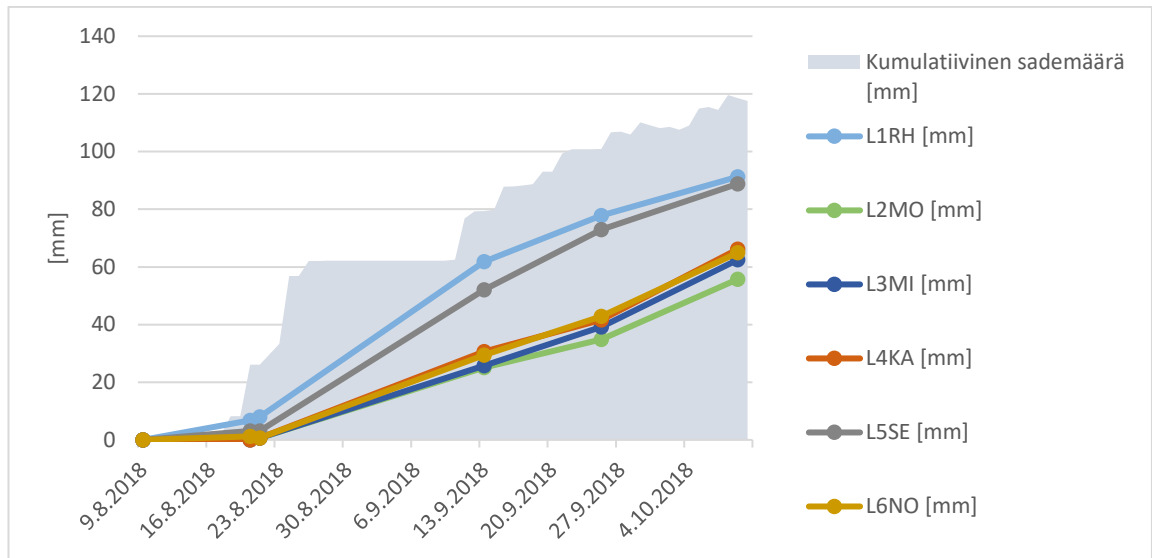
Toteutuneen haihdunnan erot muiden lysimetrien (L2MO, L3MI, L4KA, L6NO) välillä johtuvat eroista vedenjohtavuudessa ja vedenpidätyskyvyssä. Nämä vaikuttavat siihen

kuinka paljon vettä on haihdunnalle saatavilla. Karkeamman materiaalin suurempi vedenjohtavuus päästää satavan veden syvemmälle nopeammin vähentäen toteutunutta haihduntaa. Toisaalta karkeamman materiaalin vedenpidätyskyky on pienempi, ja materiaalin pinnassa oleva vesi haihtuu helpommin

Kuvassa 14. on esitetty lysimetreistä suotautuneen veden suhde sadantaan elo-lokakuussa 2018. Ennen mittauksia keruukaivojen pohjalla jo oleva vesi mitattiin. Myöhempiä mittauksia verrattiin tähän määrään, jotta korkeuden muutosta voitiin seurata. Korkeuden muutokset on muutettu ensin litroiksi käyttämällä keruukaivon pinta-alaa. Seuraavaksi litrat on muutettu muutosta vastaavaksi sademääräksi käyttämällä lysimetrin pinta-alaa. Selvästi muista erottuivat lysimetrit L1RH ja L5SE, joiden pinnat ovat maanpinnan alapuolella. Kaikissa lysimetreissä, joissa peittorakenne ylettyy maanpinnan tasalle vedenpinnoista lasketut sademäärät olivat 10 mm sisällä toisistaan. Selkeimmin näistä erottui lysimetri L2MO, jonka suotautunut vesimäärä oli tarkasteltavalla aikavälillä lopulta matalin. Niistä peittomateriaaleista, joista saturoitunut vedenjohtavuus saatiin mitattua pienin vedenjohtavuus oli moreenilla, jota lysimetrissä L2MO on eniten, mikä selittää tulosta. Lysimetri L3MI ei tällä tarkasteluvälillä erotu pienemmillä vesimäärillä, kuten se erottui suotoveden tyhjennysmäärissä. Tämä viittaa edelleen erojen tyhjennyksen vesimäärissä olevan peräisin lähinnä materiaalien vettymisessä.

L6NO lysimetri ei erotu muista kalkkipeittoja sisältävistä lysimetreistä juurikaan, vaikka Kalkmix Normal-materiaalin vedenjohtavuus oli peittomateriaaleista matalin, kun verrataan GTK:n (Karlsson ym. 2018) sille teettämien vedenjohtavuustestin tulosta tässä työssä muille materiaaleille saatuihin vedenjohtavuuksiin. Tämä saattaa selittyä KalkMix Normal-materiaalin huonommalla tiivistettävyydellä tai eroilla vedenjohtavuuden analyyseissä. Heinäkuussa 2018 huomattiin kuvassa 15 näkyvä n. 15 cm halkaisijalta oleva pienimuotoinen sortuma, mikä saattaa osaltaan selittää lysimetrin L6NO ennakoitua suurempaa vedenläpäisyyttä. Sortuma on lähellä lysimetreihin rakennettua reunavirtausta estävää 10 cm kauluksen reunaa, joten vaikuttaa, että kauluksen alapuolinen tiivistyminen ei ole onnistunut. Toisaalta myös Kalkmix Normal-materiaalin painuminen on saattanut aiheuttaa kolon. Vesi pääsee tätä reittiä ohittamaan ensimmäisen kauluksen ja pääosin

myös päällimmäisen 20cm moreenikerroksen. 50cm syvyydellä oleva seuraava kaulus estää kuitenkin osaltaan vielä koko lysimetrin läpi tapahtuvaa reunavirtausta. Keruukaivossa ei havaittu lisääntyntä kiintoainetta.



Kuva 14. Lysimetrien keruukaivojen pinnanmuutokset muutosta vastaavana sademääränä suhteessa kumulatiiviseen sademäärään välillä 9.8.2018-10.10.2018



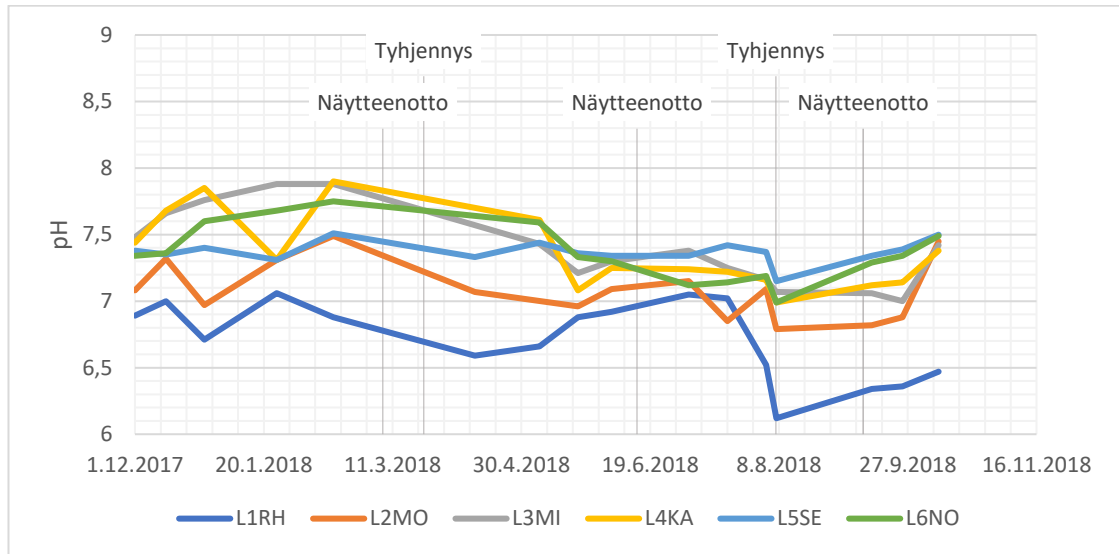
Kuva 15. Heinäkuun 2018 lopussa Normal-lysimetrissä havaittu n. 15cm halkaisijaltaan oleva pienimuotoinen sortuma (Kuva: Kinnunen J. 2018)

5.3 Lysimetrien rakenteiden läpi suotautuneiden vesien ominaisuudet

Kenttämittausten tulokset aikasarjoina on esitetty kuvissa 16-24. Kuvissa on esitetty myös alkuaineanalyysin näytteenottokerrat ja lysimetrien tyhjennykset. Lysimetrien L1RH ja L5SE ylimääräisiä kevään sulamisveden tyhjennyskertoja välillä 5.5.2018-7.6.2018 ei ole merkitty kuviin selvyiden vuoksi.

Kenttämittaukset näyttivät koerakenteiden välillä eroja, joskin ajasta riippuva vaihtelu oli mittauksissa myös suurta. Useimmissa parametreissa näkyi selvästi kaivojen ensimmäisen tyhjentämisen aiheuttama muutos. Talven ja alkukevään mittauksissa lysimetrit 1 ja 5 eivät olleet täysin vertailukelpoisia johtuen sulamisvesien suuremmasta virtauksesta näihin lysimetreihin. Lysimetrien pinta ei ollut maan tasalla aiheuttaen siten sulamisvesille reitin pääasiassa näihin kahteen lysimetriin. Lysimetreissä 2,3,4 ja 6 pinta oli maanpinnan tasolla ja vesimäärät keruukaivossakin maltillisempia.

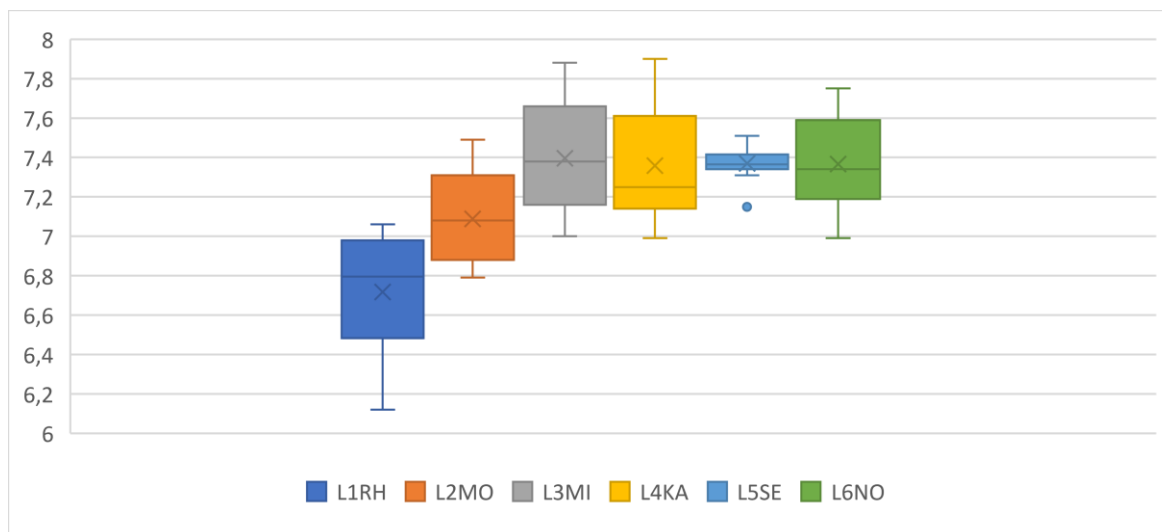
Kuvasta 16. nähdään, että pH:t kaikissa lysimetreissä noudattivat hieman laskevaa trendiä. Matalimmat pH:t mitattiin L1RH ja L2MO. Kalkkituotteita sisältävät rakenteet pitivät pH:ta noin 0,5-1 yksikköä korkeammalla eron ollessa keskimäärin 0,7 yksikköä. Erot olivat suurimmillaan talvella ja alkukevällä ja tasoittuivat sulamisvesien tyhjennyksen jälkeen ollen kuitenkin edelleen selvästi nähtävissä. Lysimetrin L1RH läpi suotautuneen veden pH: oli laskenut selvästi heinäkuun lopulta elokuuhun ja erottui muutenkin selvästi muista lysimetreistä.



Kuva 16. Lysimetrien keruukaivojen veden pH kenttämittauksissa

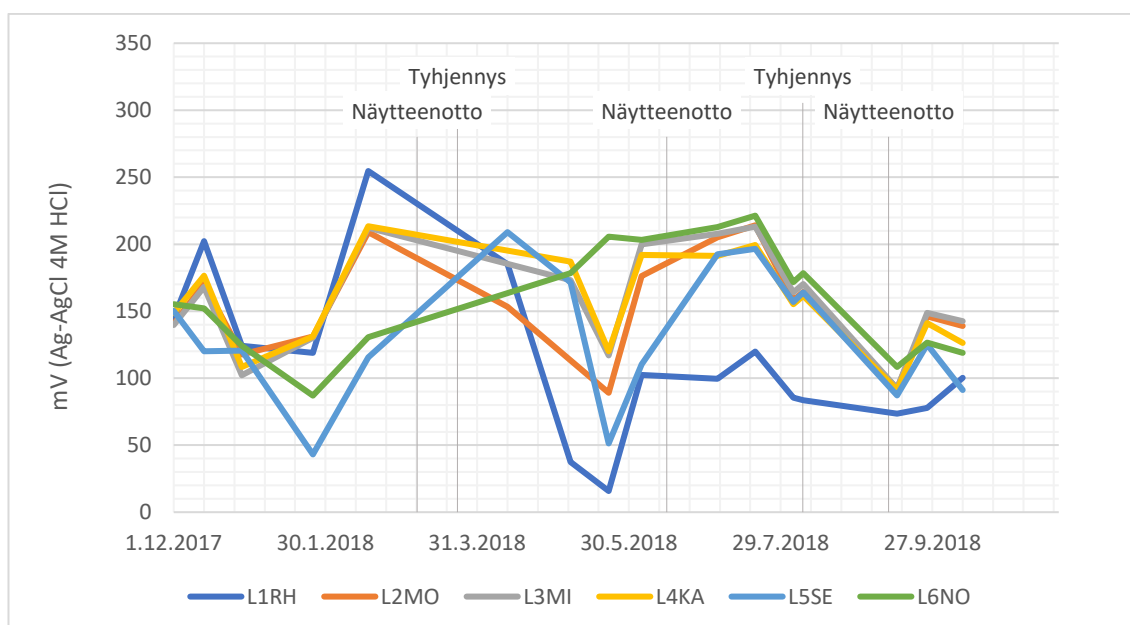
Koko aikavälillä kaikissa lysimetreissä pH:n vaihteluväli oli 6,12-7,9 välillä (kuva 17). Vastaavanlaisia suhteellisen korkeita pH:ta jälkeen on saavutettu myös puolen vuoden kolonnikokeissa kalkkituotteita sisältävillä kerrosrakenteilla lyijy-sinkkikaivoksen rikastushiekan peitossa (Zhang ym. 2016).

Pyhäsalmen rikastushiekka-altaiden ympäristön keruuojista 2006 tehdyssä kartoituksessa pH on vaihdellut alle kolmesta hieman reiluun kuuteen. Vielä hapettumattoman suotoveden pH on ollut D- ja A-altaista välillä 6-6,5 ja redox-arvot matalia. (Räisänen & Skinnari 2015) Kenttämittausten perusteella pH muistutti hapettumatonta suotovettä.



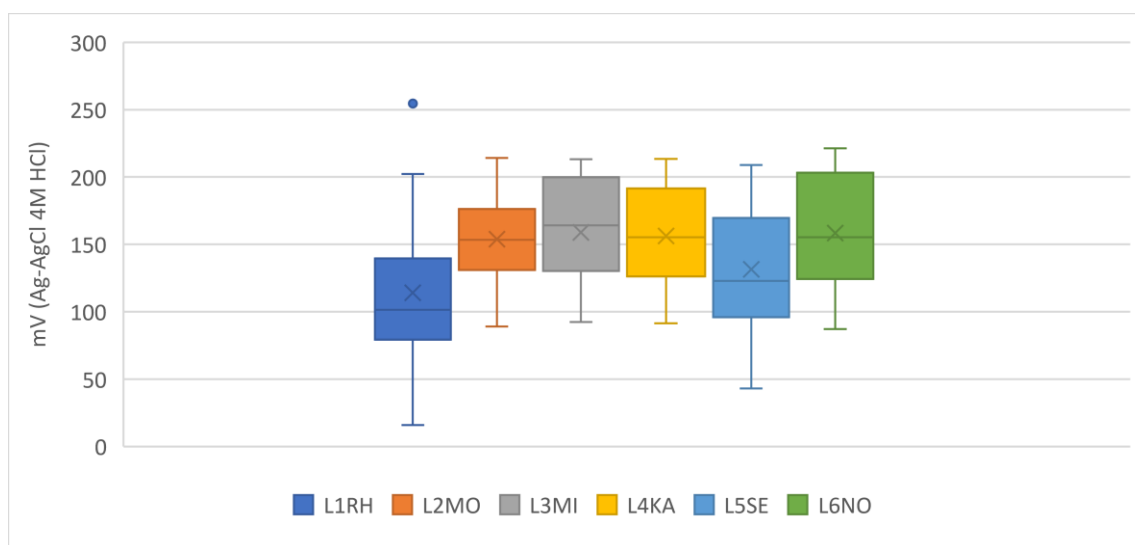
Kuva 17. Lysimetrien keruukaivojen veden pH:n vertailu laatikko-janakuviolla

Kuvassa 18 esitetyt redox-potentiaalit heittelivät melko suuresti, eikä selkeää trendiä ole nähtävillä. Kuvassa 19 nähtävillä olevia mittausten mediaaneja verrattaessa muista lysimetreistä erottuivat lähinnä L1RH ja L5SE hieman matalammalla mediaanilla ja suuremmalla hajonnalla. Muiden lysimetrien laatikko-janakuviot ovat melko samanlaisia, joskin lysimetrillä L2MO jakauma on keskittyneempi ja mediaani sekä keskiarvo matalammalla verrattuna lysimetreihin L3MI, L4KA ja L6NO.



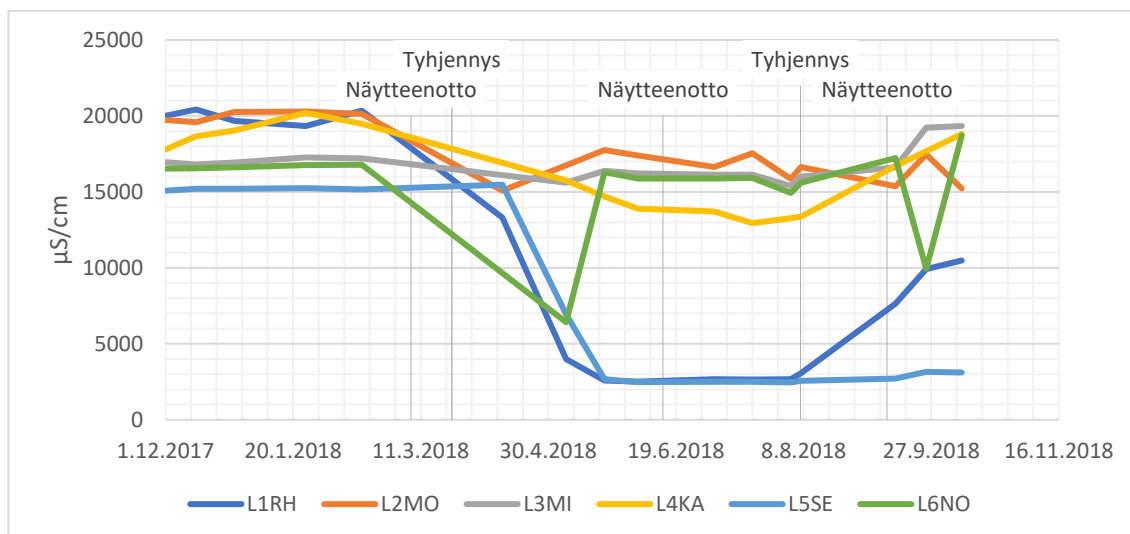
Kuva 18. Lysimetrien keruukaivojen vesien redox-potentiaali kenttämittauksissa

Pyhäsalmen suoto- ja oja-vedistä on suoritettu redox-mittauksia, joiden tulokset erosivat keskenään: suotovesissä redox oli keskimäärin alle 300 mV ja oja-vedessä yli 400 mV (Räisänen & Skinnari 2015). Redox-potentiaalit pysyttelivät kaikissa lysimetreissä alle 250 mV, joten ne vastaavat Pyhäsalmen rikastushiekka-altaan suotovesien laatua siltä osin.



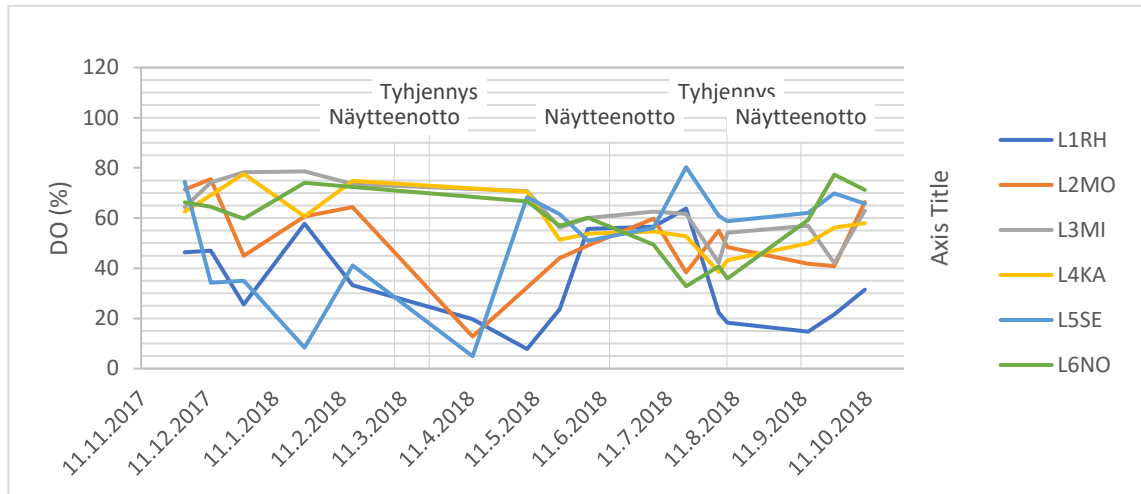
Kuva 19. Redox-mittausten laatikkojanakuviot eri lysimetriä vesille

Sähkönjohtavuus pysyi mittausten ajan välillä 15 000-21 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lukuun ottamatta lysimetrejä L1RH ja L5SE, mikä on korkea verrattuna talousveden laatusuositukseen alle 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (STM1352/2015). Lysimetriä L1RH ja L5SE sähkönjohtavuudessa on nähtävissä lumen sulannan aiheuttama huuhtoutuminen, sillä kevään aikana sähkönjohtavuus putoaa selvästi. Lysimetrissä L1RH sähkönjohtavuus alkaa kuitenkin nousta syksyllä 2018, mikä on myöhemmin nähtävissä myös alkuainemäärityksissä mitattujen pitoisuuksien kasvuna.

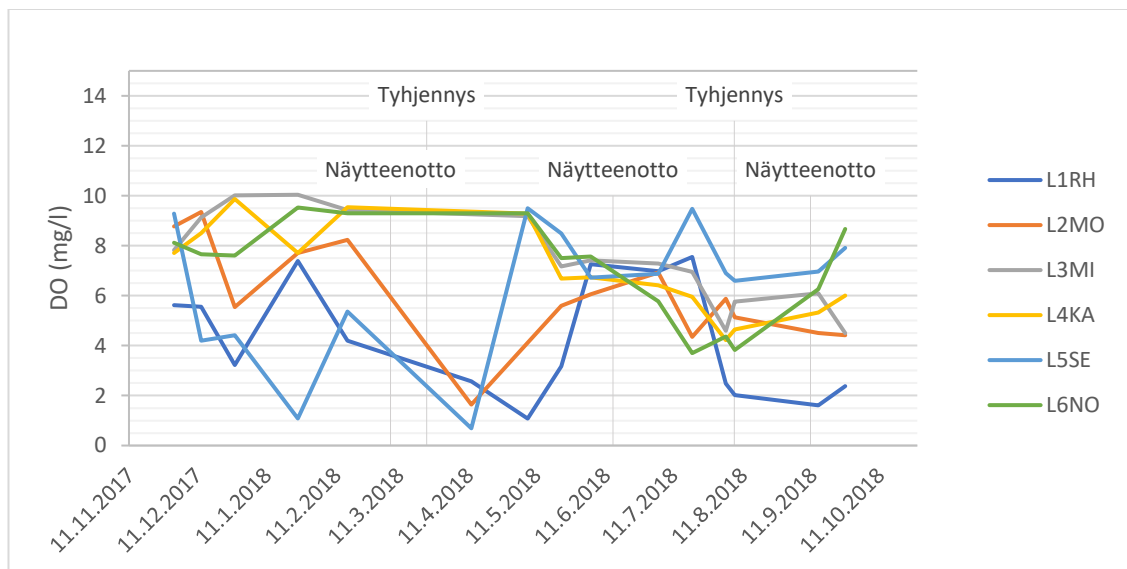


Kuva 20. Lysimetrien keruukaivojen vesien sähkönjohtavuus kenttämittauksissa

Lysimetrien happipitoisuudet vaihtelivat välillä 1-10 mg/l hapen kyllästysasteen ollessa 5-80%. Liuenneen hapen kyllästysaste (kuva 21) oli pääosin matalimpana lysimetrissä L1RH. Tämä saattaa viitata rikastushiekka-patjassa tapahtuviin hapetta-kuluttaviin reaktioihin. Reaktiot saattoivat jatkua edelleen keruukaivossa. Toisaalta myös kaivossa keskimäärin ollut suurempi vesimäärä saattoi vähentää hapen liukenemista veteen. Lysimetrit L3MI, L4KA ja L6NO muistuttivat selkeästi toisiaan hapen kyllästysasteen suhteen. Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että vesi keruukaivossa ei vakiintunut tiettyyn happipitoisuuteen keruukaivojen suuresta ilmatilavuudesta huolimatta, sillä liuenneen hapen kyllästysasteessa oli mittauskerroittain tarkasteltuna lysimetrien välillä selkeitä eroja. Kyllästysastetta vastaavat pitoisuudet on esitetty kuvassa 22.

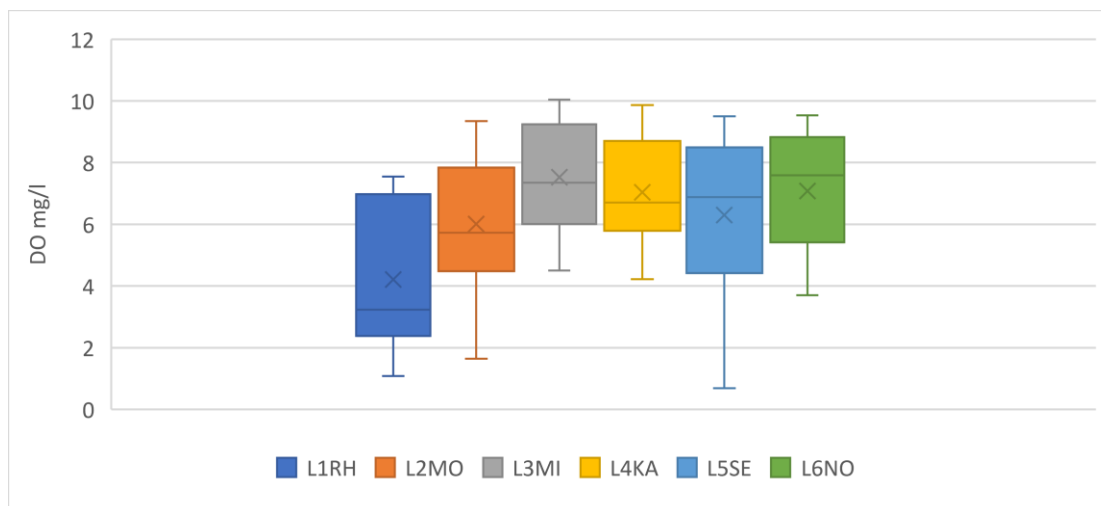


Kuva 21. Lysimetrien keruukaivojen vesien liuenneen hapen kyllästysaste kenttämittauksissa

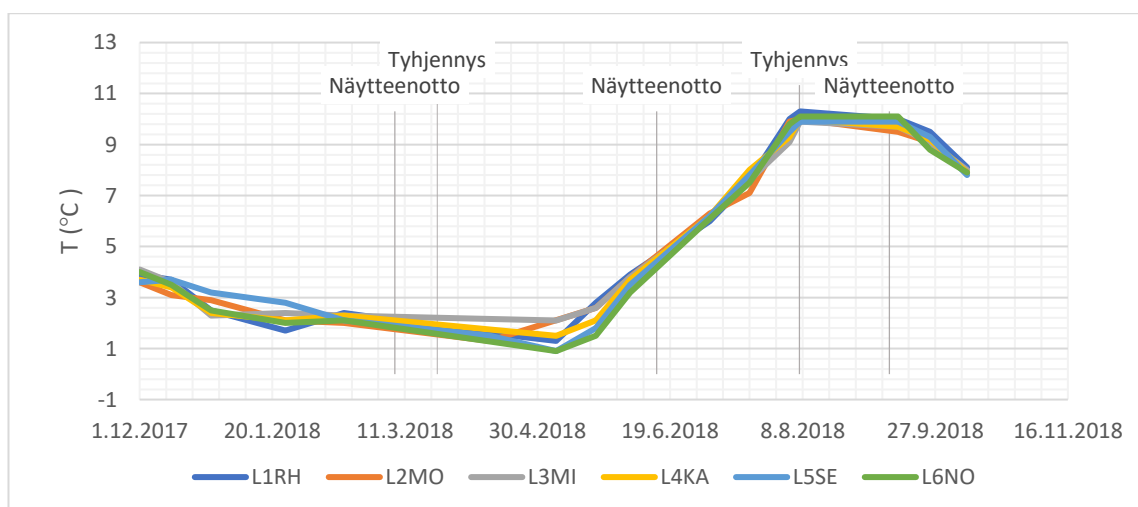


Kuva 22. Lysimetrien keruukaivojen vesien liuenneen hapen pitoisuus kenttämittauksissa

Pyhäsalmen kaivokselta 2006 mitatut happipitoisuudet suotovesissä ovat olleet keskimäärin alle 3mg/l ja ojissa hapen kanssa kontaktissa olleissa vesissä 4-5 mg/l (Räisänen & Skinnari 2015). Kuvassa 23 esitettyjen mittaustulosten laatikkojanakuvioiden perusteella lysimetrien läpi suotautuneet vedet vastasivat ennemmin hapen kanssa kontaktissa olleita vesiä.

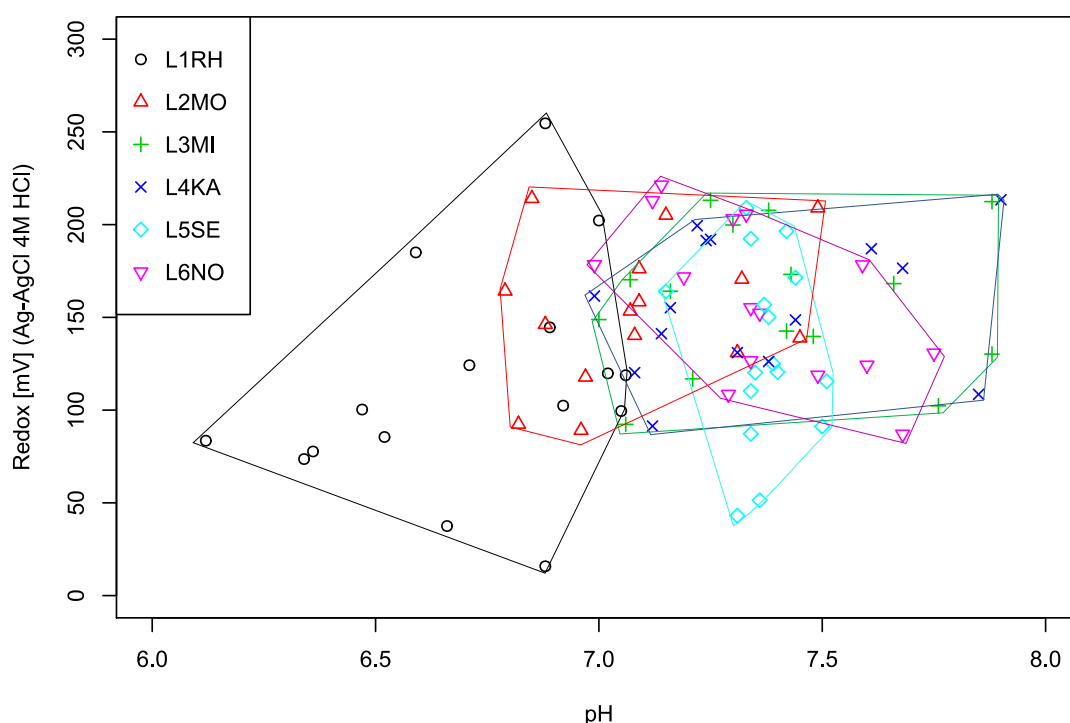


Kuva 23. Lysimetrien keruukaivojen vesien liuenneen hapen laatikko-janakuvio. Lämpötilat vaihtelivat välillä 1-10 °C, eikä merkittäviä eroja lysimetrien välillä havaittu. Tämän perusteella yhden mittauskerran ORP-mittaukset ovat lämpötilan puolesta vertailukelpoisia.



Kuva 24. Lysimetrien keruukaivojen veden lämpötila kenttämittauksissa. Koejärjestelyn aikana kenttämittarilla mitatut hapetus-pelkistysolosuhteet pH:n suhteen on esitetty kuvassa 25. Merkittävää trendiä näiden välillä ei ollut havaittavissa. Lysimetri L1RH poikkesi muista selkeästi polygonin sijoittumisella matalamman pH:n alueella. Myös polygonin pinta-ala oli muita suurempi. Lysimetrit L3MI, L4KA ja L6NO muistuttivat toisiinsa niin pH:n kuin redoxin jakautumisessa. Lysimetrin L5SE pH pysyi muihin lysimetreihin verrattuna stabiilina välillä 7,3-7,5. Tämä saattaa selittyä

sekoittamisen tarjoamasta paremmasta kontaktista rikastushiekan ja osittain palaneen kalkin välillä, minkä ansiosta osittain palanut kalkki reagoi ja liukenee haponmuodostuksen mukana puskuroiden siten pH:ta muita peittoja paremmin. Veden pH:n stabiilius on yllättävää myös sen takia, että lysimetri 5 yksi niistä kahdesta lysimetristä, jonka lävitse virtasi selkeästi enemmän vettä sulannan aikana. Koska lumen pH:n on arvioitu Keminmaa-Tornio-alueella olevan 4,5-4,7 voisi olettaa sulannan näkyvän pH:n vaihteluna (Soveri & Peltonen 1996).

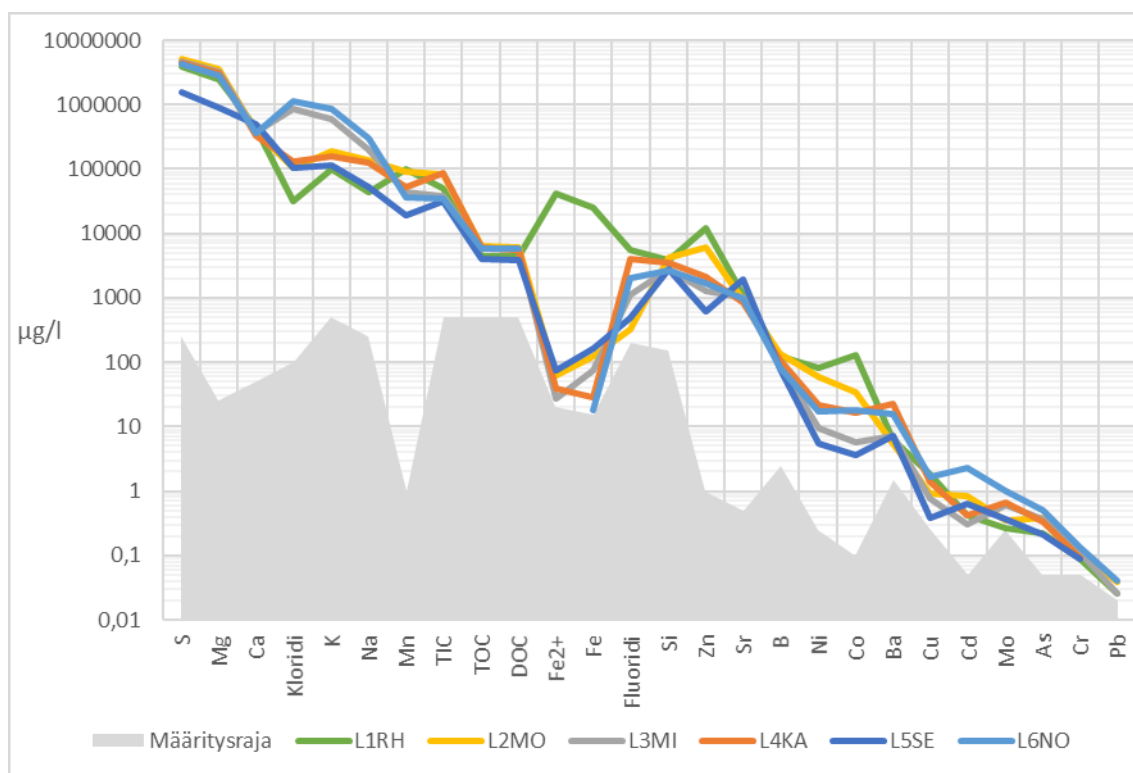


Kuva 25. Lysimetrien suotoveden hapetuspelkistysolosuhteet pH:n suhteen kenttämittausten aikana

5.3.1 Suotoveden liukoisten aineiden pitoisuudet

Suotovesistä teetettyjen alkuaineanalyysien tulokset on esitetty liitteessä 3. Kuvassa 26 on esitetty neljän näytteenottokerran perusteella lasketut alkuaineiden liukoisten pitoisuuksien keskiarvot logaritmisessa asteikossa. Lisäksi on esitetty määrittäysrajat. Sen

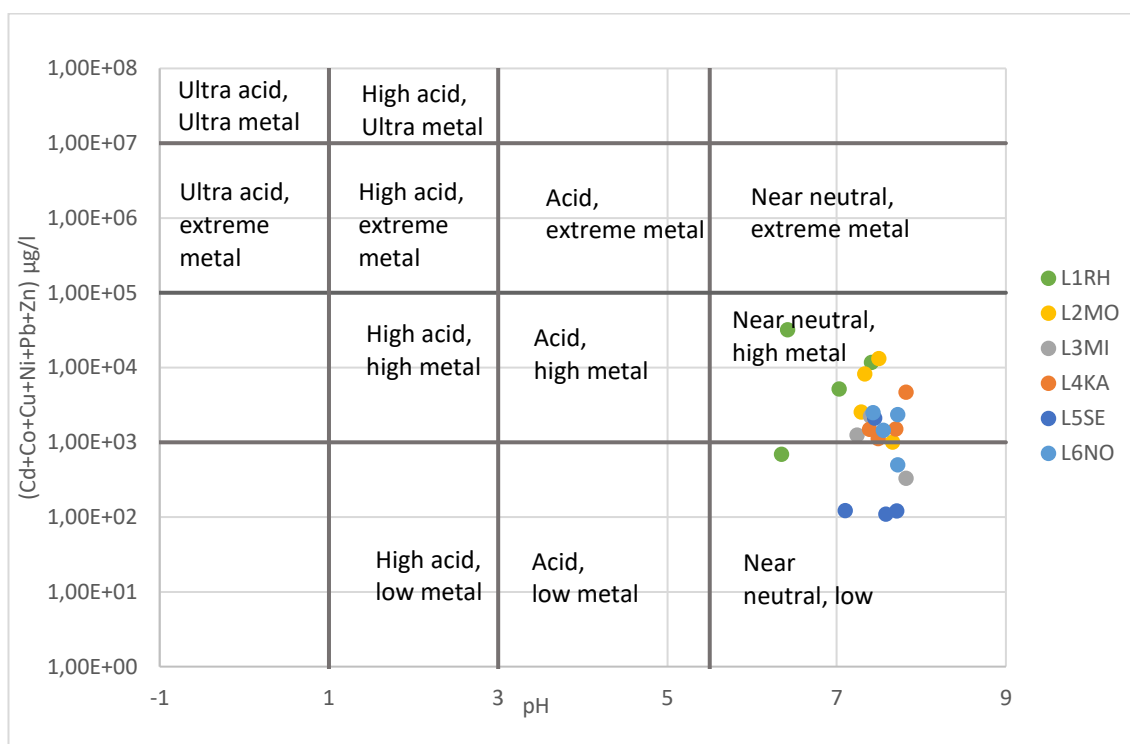
jälkeen tuloksia on esitelty tarkemmin mitattujen pitoisuuksien mukaan jaoteltuna kuvissa 29-31. Lisäksi hiilen analyysit on esitetty erikseen kuvassa 32. Kuvassa 27 on esitetty vesien luokittelu Fickling-diagrammin mukaan. Kaikissa mittauksissa alumiinin ja fosforin pitoisuudet jäivät alle määrittäysrajan ($Al < 0,03 \text{ mg/l}$ ja $P < 0,05 \text{ mg/l}$). Analyysituloksia on pitoisuuksien suhteuttamiseksi verrattu myöhemmin tekstissä juomaveden laatuvaatimuksiin ja suosituksiin. Lisäksi vertailukohtana on käytetty Pyhäsalmen kaivoksen päästöraja-arvoja ja sisämaan pintavesien ympäristölaatunormeja. Osiossa 5.4.2 verrataan lysimetrien läpi suotautuneen vesien alkuaineiden liukoisia pitoisuuksia Pyhäjärven vesien ja Pyhäsalmen kaivoksen jätevedestä 2006 mitattuihin alkuainepitoisuuksiin.



Kuva 26. Lysimetrien suotovedestä otettujen neljän näytteenottokierrosten analyysien keskiarvot logaritmisessa asteikossa yhdessä analyysien määrittäysrajojen kanssa

Fickling-diagrammissa luokitellaan vedet sinkin kuparin, kadmiumin lyijyn, koboltin ja nikkelin pitoisuuksien summan, sekä pH:n mukaan Ultra-happamasta, ultra metallipitoisista aina lähes neutraaleihin vähämetallisiin vesiin. (Plumlee ym. 1999a)

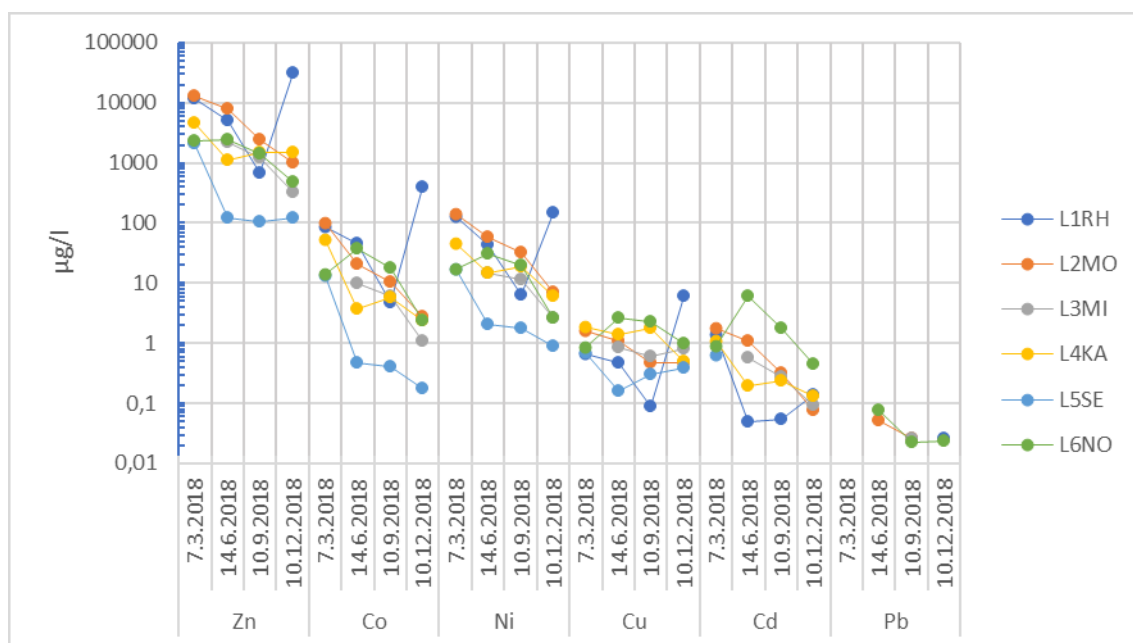
Analyysitulosten sijoittuminen kaaviossa on esitetty kuvassa 27. Kuvassa esitetyt pH:t mitattiin laboratoriossa. Suotautunutta vettä ei voitu luokitella varsinaiseksi happamaksi valumaksi, mutta kohonneita metallipitoisuuksia havaittiin. Pääosin suotovesien tulokset sijoittuivat lähes neutraaleihin korkean metallipitoisuuden vesiin, joskin lysimetrin L5SE tapauksessa kolme neljästä mittauksesta sijoittui matalan metallipitoisuuden luokkaan. Myös yksittäiset lysimetrien L1RH, L3MI ja L6NO luokiteltiin matalan metallipitoisuuden puolelle. Lysimetrit L1RH ja L2MO erottuivat keskimäärin korkeammilla metallipitoisuuksilla ja matalammalla pH:lla. Lysimetrit L3MI, L4KA ja L6NO muistuttivat suuresti toisiaan sekä metallipitoisuuksien, että pH:n osalta.



Kuva 27. Tutkittujen lysimetrien suotovesien metallipitoisuudet (kadmium, koboltti, kupari, nikkeli lyijy ja sinkki) Fickling -diagrammissa (logaritminen asteikko)

Fickling -diagrammiin otettujen metallien analyysistä on tarkasteltu lähemmin kuvassa 28. Neljän mittauksen perusteella metallien liukoiset pitoisuudet kuparia lukuun ottamatta vaikuttivat seuraavan jossain määrin laskevaa trendiä. Tämä saattaa viitata metalliyhdisteiden huuhtoutumiseen huokosvedestä, mikä vähenee jo huuhtoutuneiden

aineiden poistuessa patjasta. Selkeästi trendistä poikkesi lysimetristä L1RH otettu viimeisin näyte, jossa kaikkien metallien pitoisuudet olivat nousussa ja ylittivät sinkin koboltin ja nikkelin osalta kokeen alussa havaitut pitoisuudet. Lisäksi laskevasta trendistä poikkesi hieman lysimetri L6NO, jossa toisella mittauksella mitattiin suurimmat pitoisuudet kaikkia metalleja. Ensimmäisen analyysikerran jälkeen tapahtunut sulanta vaikuttaa huuhdelleen metallit erityisesti lysimetrin L5SE tapauksessa, jossa kolme viimeisintä mittausta asettuivat selkeästi matalammalle tasolle. Vaikka lysimetrin L1RH läpi virrannut vesimäärä oli suurempi, kuin lysimetrissä L5SE ei yhtä voimakasta vaikutusta ole nähtävissä. Kesäkuun analyysikerta ei näytä poikkeavan pitoisuuksien osalta muista, vaikka osa vesistä on sulamisvettä.



Kuva 28. Fickling-diagrammissa esitettyjen metallien liukoiset pitoisuudet analyysikerroittain esitettynä logaritmisessa asteikossa

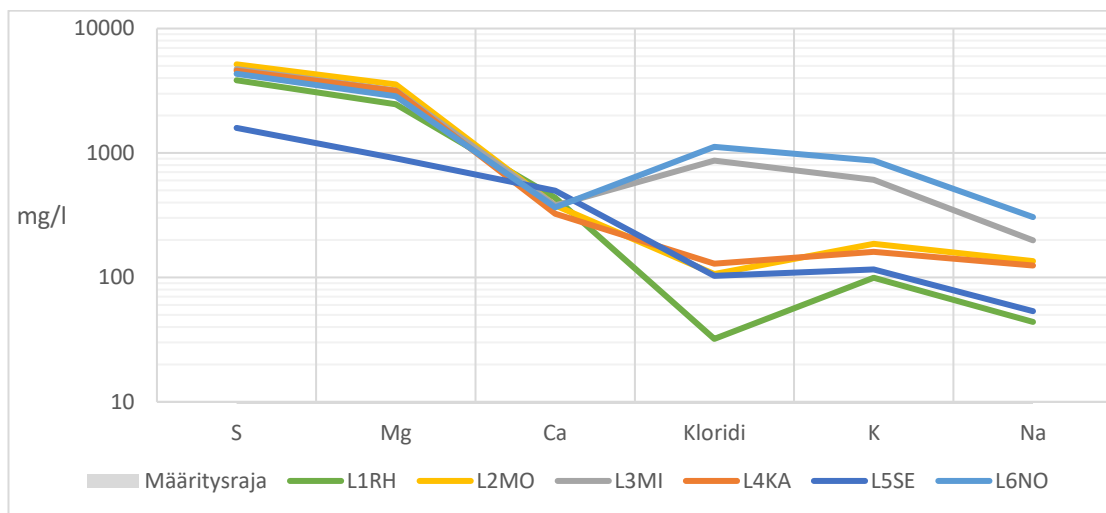
5.3.2 Suotoveden liukoisten aineiden pitoisuudet verrattuna muun muassa talousveden laatuvaatimuksiin

Tässä osassa lysimetrien suotovesien alkuainepitoisuuksia on verrattu talousveden laatuvaatimuksiin ja laatusuosituksiin, soveltuviin ympäristölaatunormeihin ja Pyhäsalmen kaivoksen ympäristöluvan raja-arvoihin.

Rikkipitoisuuksien keskiarvot olivat välillä 3000-5500 mg/l ja magnesiumipitoisuuksien keskiarvot välillä 2400-3600 lukuun ottamatta lysimetriä L5SE (kuva 29). Lysimetri L5SE poikkesi muista matalammilla pitoisuuksien keskiarvoilla. Suotovesien kalsiumpitoisuuksissa ei ollut merkittävää eroa lysimetrien välillä riippumatta onko kalkkituotteita käytetty peitossa vai ei. Tämä saattaa selittää tasaisia rikkipitoisuuksiakin: Sulfaatti saattaa muodostaa kalsiitin läsnä ollessa kipsiä pitäen sulfaattipitoisuuden noin 400 ppm (Rescan Environmental Services Ltd. 1989, s. 2-4.). Tähän verrattuna mitatut rikkipitoisuudet olivat kuitenkin korkeat.

Lysimetrien L6NO ja L3MI suotovesistä mitatut kloridipitoisuudet olivat muita lysimetrejä selvästi korkeammat. Tätä selittävät aiemmin esiteltyt liukoisuustestien tulokset, joissa kloridin pitoisuudet ylittivät pysyvän jätteen raja-arvon, joskin Mild-materiaalin liukoisuudet olivat tuolloin Normal-materiaalia suuremmat. Myös lysimetrien L6NO ja L3MI suotovesien kalium ja natriumpitoisuuksien keskiarvot olivat muita korkeammat.

Kloridi- ja rikkipitoisuuden perusteella kaikki suotautuneet vedet ylittivät selvästi talousveden laatusuosituksen (STM 1352/2015) kloridille ja sulfaatille (<250 mg/l). Natriumpitoisuuksien keskiarvot puolestaan alittivat talousveden laatusuosituksen alle 200 mg/l lukuun ottamatta Normal -peittoa, jossa keskiarvo oli 305 mg/l. Pyhäsalmen kaivoksella käytetään vaahdotuksen kokoojakemikaalina natrium-isobutyliksantaattia (Kauppila ym. 2011). Osa natriumista oli todennäköisesti peräisin siitä.



Kuva 29. Lysimetrikokeissa eniten liuenneet aineet neljän analyysin keskiarvona logaritmisessa asteikossa

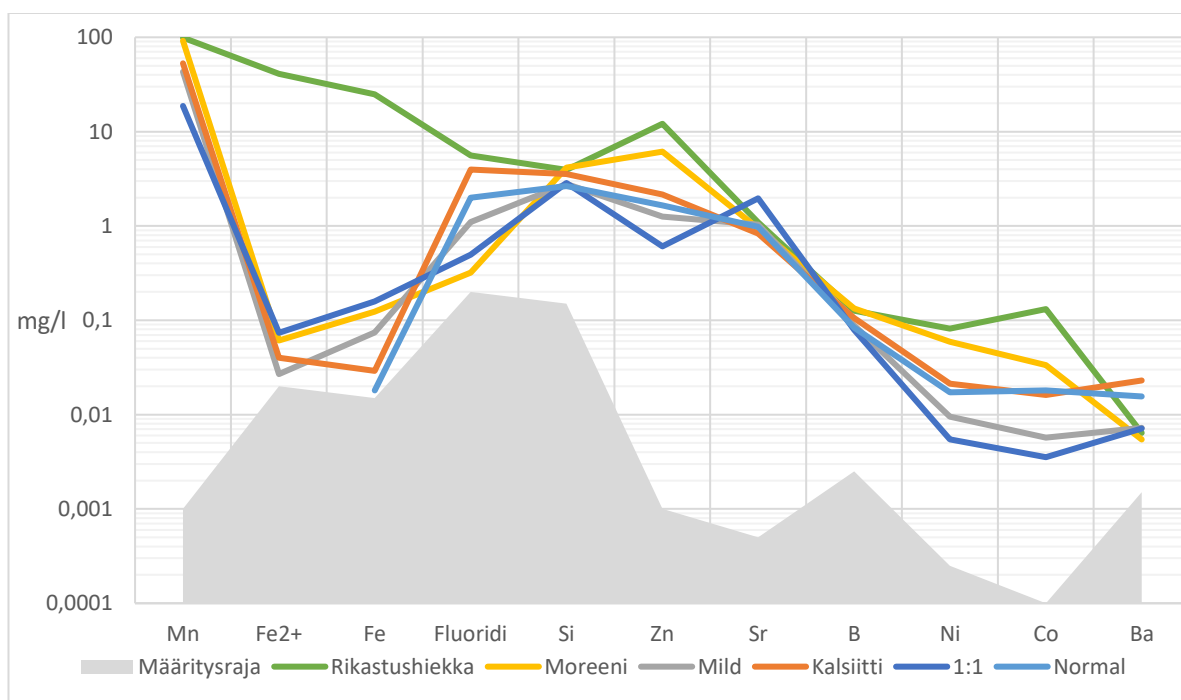
Kaikkien mitattujen mangaanin pitoisuuksien keskiarvot ylittivät selvästi talousveden laatusuosituksen 50 µg/l (STM 1352/2015). Kalkkituotteiden käytöstä peitossa näyttää kuitenkin olevan hyötyä, sillä korkeimmat keskiarvoiset pitoisuudet olivat peittämättömästä rikastushiekkapeitosta ja moreenipeitosta.

Todennäköisesti mitatut rautapitoisuudet olivat pääosin kahdenarvoista rautaa. Fe(II) -pitoisuuksien keskiarvot olivat lysimetrin L1RH vesissä korkeammat kuin kokonaisrautapitoisuudet, mikä johtuu osittain siitä, että analyysirajat ylittäviä kokonaisrautapitoisuuksia mitattiin kolmella mittauskerralla, joista yksi on selvästi matalampi, kun taas analyysirajat ylittäviä Fe(II) -pitoisuuksia mitattiin kahdella mittauskerralla. Kuitenkin myös mittauskerroittain tarkasteltuna Fe(II) -pitoisuudet ovat hieman alkuaineraudan analyysijä korkeammat, mikä selittyy eroilla analyysimenetelmissä. Pitoisuuksien keskiarvoista talousveden rautapitoisuuden laatusuositus ylittyi ainoastaan lysimetrin L1RH vesissä (STM 1352/2015).

Pii-, strontium ja booripitoisuuksien keskiarvo ei juurikaan eronnut lysimetrien välillä. Kaikkien lysimetrien booripitoisuudet alittivat selvästi talousveden raja-arvon, joka on 1 mg/l (STM 1352/2015). Kalsiitti- ja Normal- lysimetrit erottuivat korkeammilla bariumin liukoisilla pitoisuuksilla ja suhteellisen korkeilla fluoridipitoisuuksilla. Fluoridin

mitatuista keskiarvoista kalsiitti, Normal ja peittämätön rikastushiekka ylittivät talousveden laatuvaatimuksen 1,5 mg/l (STM 1352/2015).

Nikkelin pitoisuuksille annettu sisämaan pintavesien ympäristölaatunormi vuosikeskiarvona on 20 µg/l, mikä vastaa myös talousveden laatuvaatimusta (VNa1308/2015, STM 1352/2015). Mitatut pitoisuuksien keskiarvot alittivat rajan kalkkituotteita sisältäviä peittoja käytettäessä, mutta nikkelin normi ylittyi lysimetrien L2MO ja L1RH vesissä. Myös koboltin ja sinkin pitoisuudet olivat keskimäärin pienempiä kalkkia sisältävistä rakenteista. Sinkin pitoisuuden keskiarvot vesissä ylittivät Pyhäsalmen kaivoksen ympäristöluvan kalenterikuukauden virtaamapainotteisena keskiarvona annetun raja-arvon 1,0 mg/l lukuun ottamatta lysimetriä L5SE (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2007).



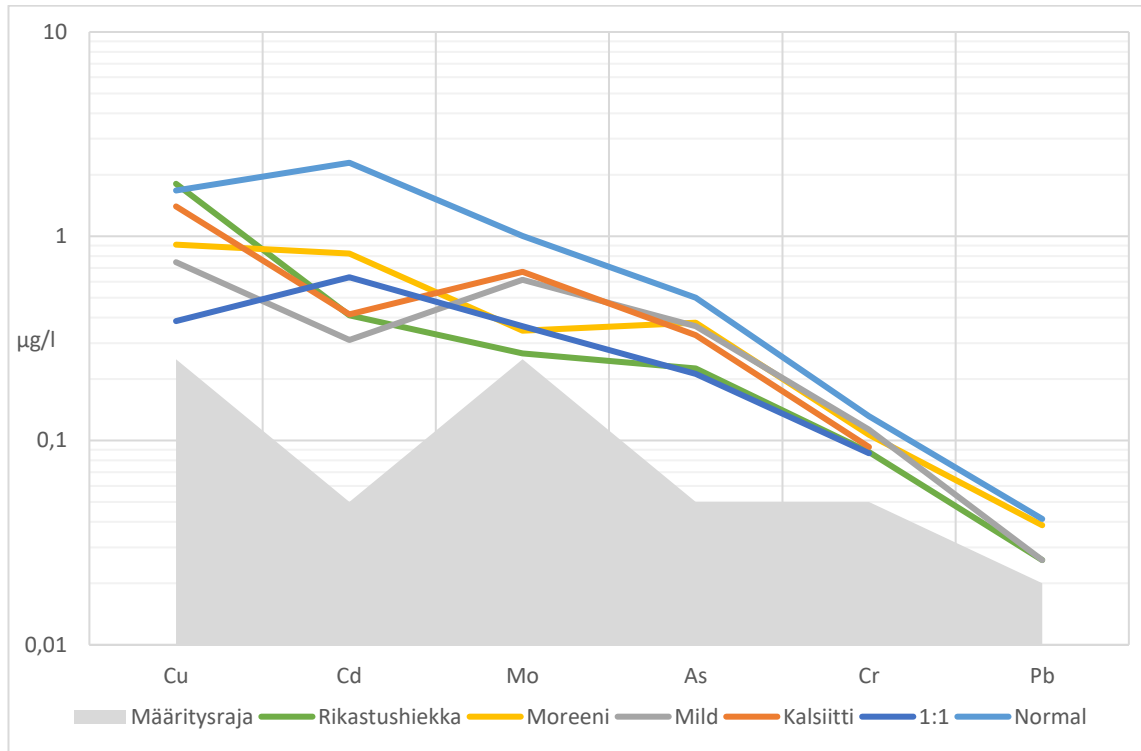
Kuva 30. Konsentraatiot mg/l -luokassa neljän mittauksen keskiarvona logaritmisessa asteikossa

Arseenin, kuparin, kadmiumin, kromin lyijyn ja lyijyn pitoisuudet täyttivät talousveden laatuvaatimukset kaikkien lysimetrien vedessä (As <10 µg/l, Cu <20 mg/l, Cr <50 µg/l, Pb <10 µg/l, (STM 1352/2015)). Molybdeenille ei ole annettu maksimipitoisuutta, mutta

sen pitoisuudet vesissä olivat samaa luokkaa kuparin ja kadmiumin kanssa. Pitoisuudet alittivat Pyhäsalmen kaivoksen ympäristöluvan kalenterikuukauden virtaamapainotteisena keskiarvona kuparille annetun raja-arvon (0,2 mg/l) kaikissa vesissä (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2007).

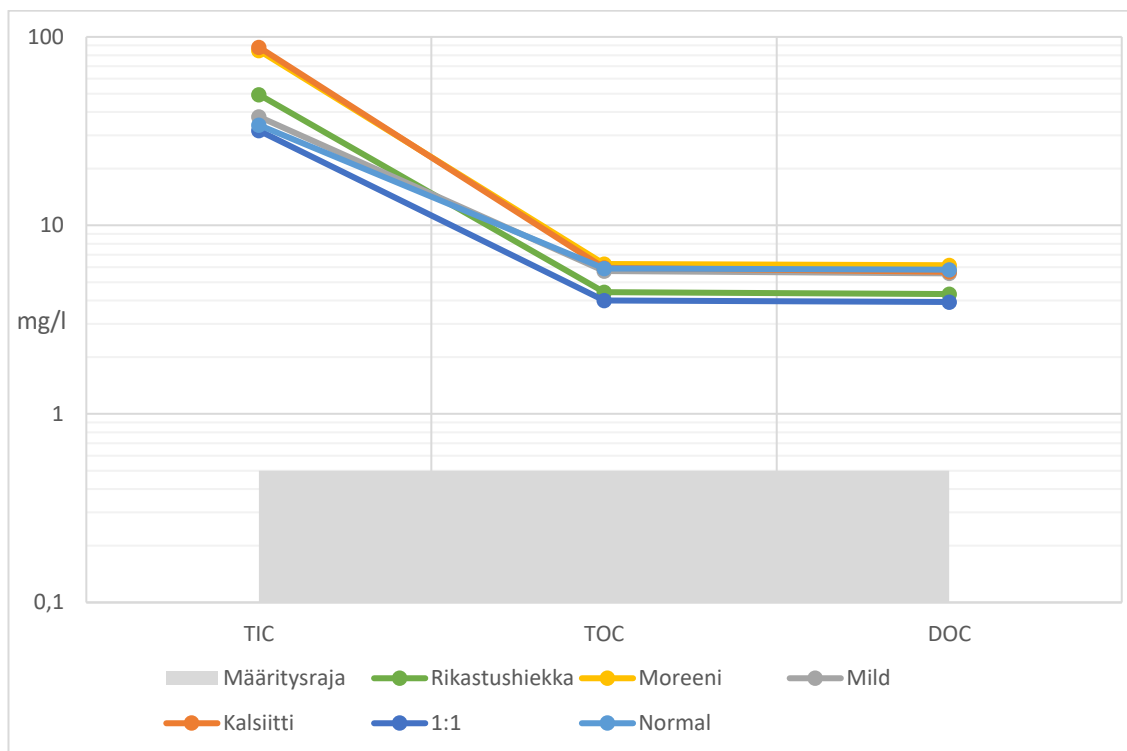
Lyijyn analyysitulokset alittivat analyysirajan 0,1 µg/l kaikissa lysimetreissä, kun koe oli ollut käynnissä noin seitsemän kuukautta. Kokeen keston ollessa noin 11 kuukautta analyysiraja ylittyi ainoastaan lysimetreissä L2MO ja L5NO, kuten myös 14 kuukauden näytteenottokierroksella. 17 kuukauden kohdalla suoritetuissa mittauksissa analyysiraja ylittyi lysimetreissä L1RH ja L6NO. Lyijyn osalta suotautuvat vedet alittivat talousveden vaatimuksen lisäksi myös sisämaan pintavesien vuosikeskiarvolle annetun ympäristölaatunormin 1,2 µg/l (STM 1308/2015).

Kadmiumin ympäristölaatunormi sisämaan pintavesien vuosikeskiarvolle on 0,08-0,25 µg/l riippuen veden kovuudesta, eli CaCO₃-pitoisuudesta (STM 1308/2015). Normi ylittyi suotautuneessa vedessä riippumatta peittorakenteesta, mutta erityisesti lysimetri L6NO erosi muista korkeammilla pitoisuuksilla. Pitoisuuksien keskiarvot kuitenkin alittivat kadmiumin enimmäispitoisuudet talousvedessä 5 µg/l (STM 1352/2015).



Kuva 31. Hivenmetalleiden (<10 μg/L) ja arseenin pitoisuudet neljän mittauksen keskiarvona logaritmisessa asteikossa

Hiiltä koskevat analyysituloksissa on esitetty kuvassa 32. Hiilen määrittäjästä eniten eroavaisuuksia oli epäorgaanisessa hiilessä, jossa lysimetrit L4KA ja erottuvat korkeammilla pitoisuuksilla. Orgaanisten hiilten pitoisuuksissa matalampina erottui lysimetrit, joissa veden virtaus on ollut suurempaa. Tämä viittaa kemikaalien huuhtoutumiseen huokosvedestä.

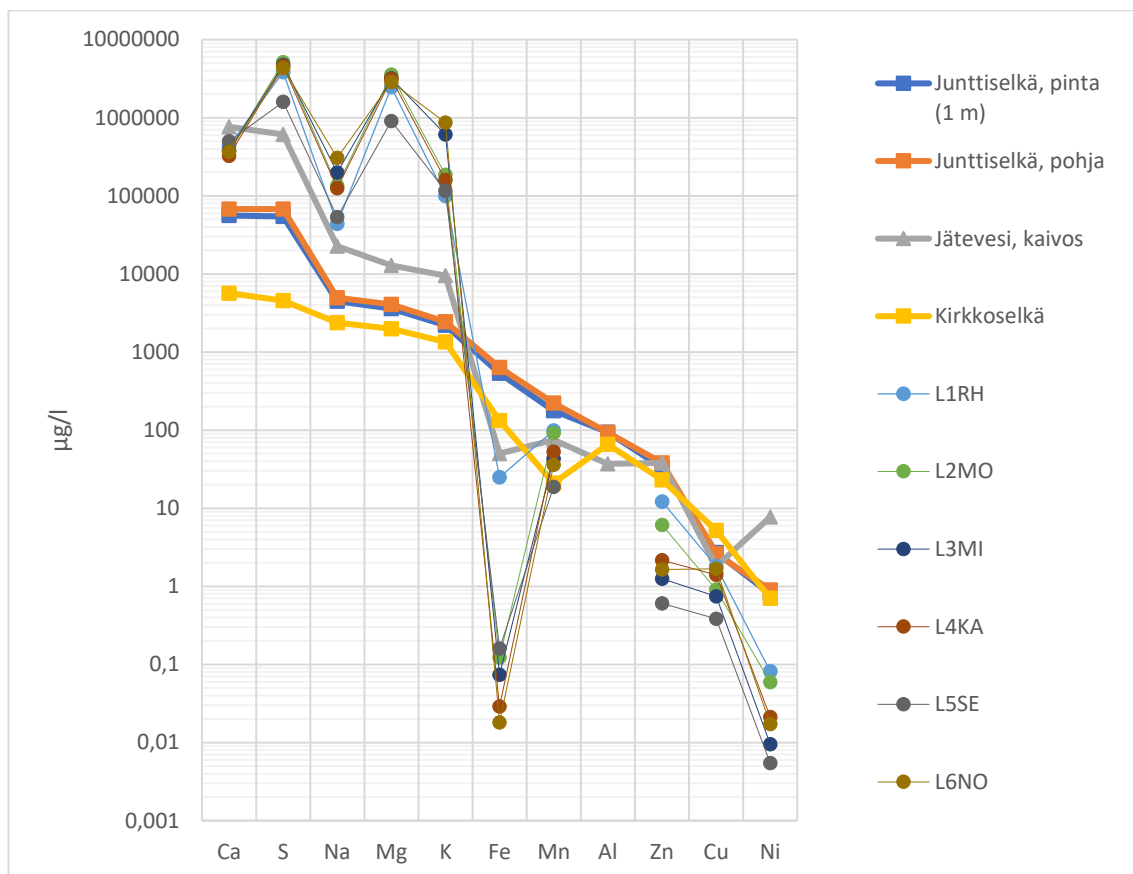


Kuva 32. Hiilen määritykset neljän analyysin keskiarvona logaritmisessa asteikossa

5.3.3 Lysimetrien alkuainepitoisuudet verrattuna Pyhäjärven luonnontaustaan ja Pyhäsalmen kaivoksen jätevesiin

Lysimetrien suotovesiä on verrattu GTK:n vuonna 2006 Pyhäjärven Junttisälän ja Kirkkoselän, sekä Pyhäsalmen kaivoksen jätevedestä otettujen näytteiden tuloksiin (Heikkinen & Väisänen 2007). Vertailu on esitetty kuvassa 33. Luonnontaustan mittauksissa ei mainittu, että vesinäytteitä olisi suodatettu. Tämä saattaa jonkin verran vääristää vertailua lysimetreistä tässä työssä analysoituihin liukoisiin pitoisuuksiin. Kaikkien lysimetrien suotovedet ylittivät luonnollisen tason rikin, natriumin, magnesiumin ja kaliumin pitoisuuksissa. Lysimetrien suotovesien alumiinin, raudan, sinkin, kuparin ja nikkelin pitoisuudet alittivat luonnon taustapitoisuudet. Mangaanin pitoisuudet lysimetrien suotovedessä olivat pääosin Kirkkoselän ja kaivoksen jäteveden tulosten väliltä. Junttisälän tulokset erottuvat puolestaan selkeästi lysimetrien suotovesiä korkeammilla mangaanipitoisuuksilla.

Kalsiumpitoisuudet lysimetreissä ylittävät luonnontaustan, mutta ovat kaivosvedestä mitattuja pitoisuuksia hiukan pienemmät. Lysimetrien L1RH, L6NO ja L4KA kuparipitoisuudet ovat samaa luokkaa kaivoksen jätevesien kanssa.



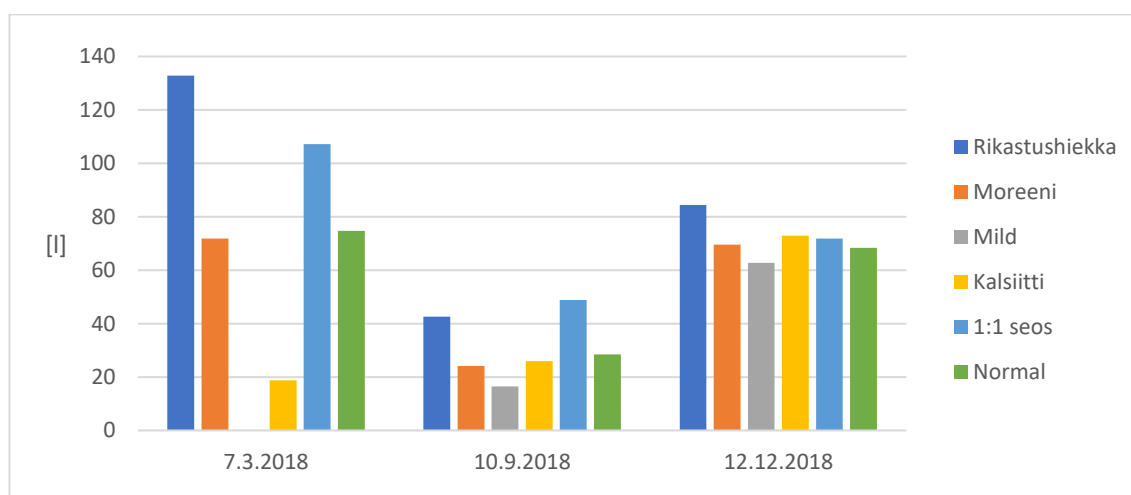
Kuva 33. Lysimetrien suotoveden alkuainepitoisuudet verrattuna Pyhäjärven Junttiselältä ja Kirkkoselältä sekä Pyhäsalmen kaivokseen jätevesistä 2006 mitattuihin pitoisuuksiin logaritmisessa asteikossa

5.3.4 Liuenneiden aineiden kokonaismäärät

Alkuaineanalyysien perusteella voidaan arvioida liuenneiden aineiden kokonaismääriä kertomalla konsentraatiot kerätyn veden määrällä. Maaliskuun näytteenottokerran vesi on suotautunut aikavälillä 26.7.-7.3.2018, syyskuun välillä 9.8.-10.9.2018 ja joulukuun välillä 16.10.-10.12.2018. Joulukuun vesimäärä saatiin analyyseista kahden päivän jälkeen tehtyjen kenttämittausten yhteydessä suoritettuna pinnanmittauksen tuloksena. Massojen laskemiseen käytetyt vesimäärät on esitetty kuvassa 34. Kuvasta on nähtävissä,

että suotautuneen vesimäärän erot tasoittuivat kokeen edetessä, mikä näkyy myös luonnollisesti laskennallisissa massoissa. Ensimmäisen analyysikierroksen erot vesimäärissä saattoivat johtua eroista materiaalien kosteuksissa koerakenteita rakennettaessa. Huokosiin jäänyt ilma hidastaa vedenvirtausta ja kun materiaalien huokokset löytävät tasapainotilan, vedenvirtaus tasoittuu.

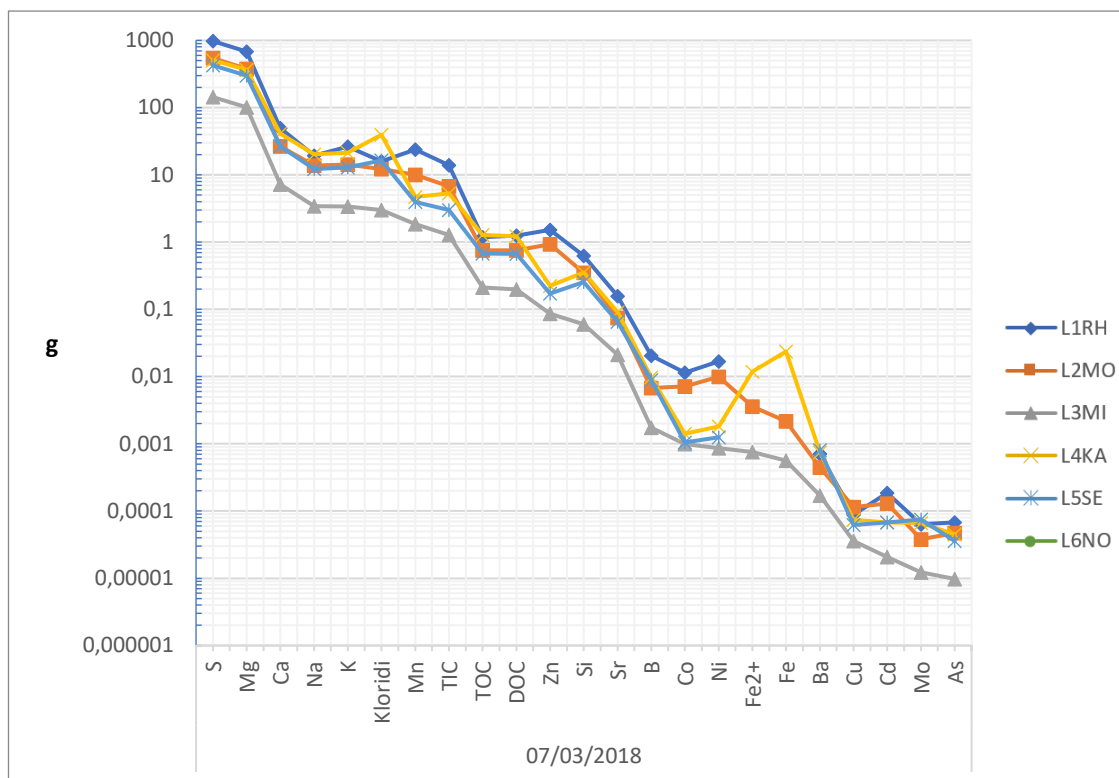
Kesäkuun näytteenottokierrosta ei ole huomioitu, sillä ennen näytteenottoa vettä on tyhjennetty usealla eri kerralla eri lysimetreistä. Koska tyhjennysten välinen aika vaihtelee lysimetreittäin, eikä lysimetrejä aina keväällä tyhjennetty kokonaan, on kutakin analyysinäytettä vastaavan veden määrää vaikea arvioida kesäkuun osalta. Lisäksi sulamisveden vaikutus oli suuri kyseisellä näytteenottokerralla.



Kuva 34. Massojen laskemiseksi käytetyt vesimäärät lysimetreittäin ja näytteenottokerroittain jaoteltuna

Maaliskuun näytteenottokerralla (kokeen kesto n. 7 kk) fluoridi, lyijy, kromi, alumiini ja fosfori alittivat analyysirajat. Lysimetrissä L3MI ei ollut riittävästi vettä näytteenottoon. Erot vesimäärissä näkyvät selvästi massojen erillisinä tasoina, matalimpana erottuu toiseksi vähiten vettä päästänyt lävitseen päästänyt L4KA lysimetri (kuva 35). Mangaanin, sinkin, koboltti- ja nikkelin liuenneet massat olivat korkeampia lysimetreistä L2MO ja L1RH. Myös kadmiumin ja kuparin liuenneet massat olivat suurempia näissä koerakenteissa. Lysimetri L6NO ei vielä erottunut suuremmilla pitoisuuksilla

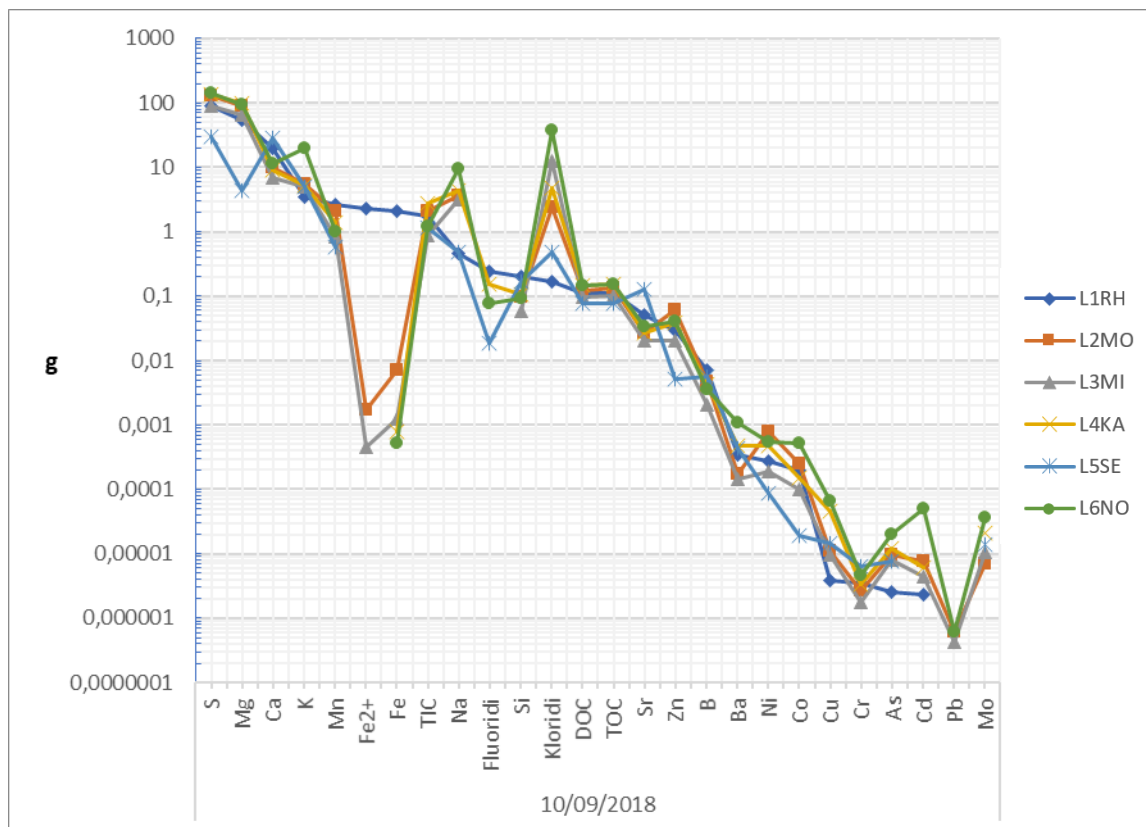
kuten myöhemmillä analyysikerroilla. Lysimetristä L5SE liukeni eniten rautaa, mikä poikkeaa myös myöhemmistä tuloksista.



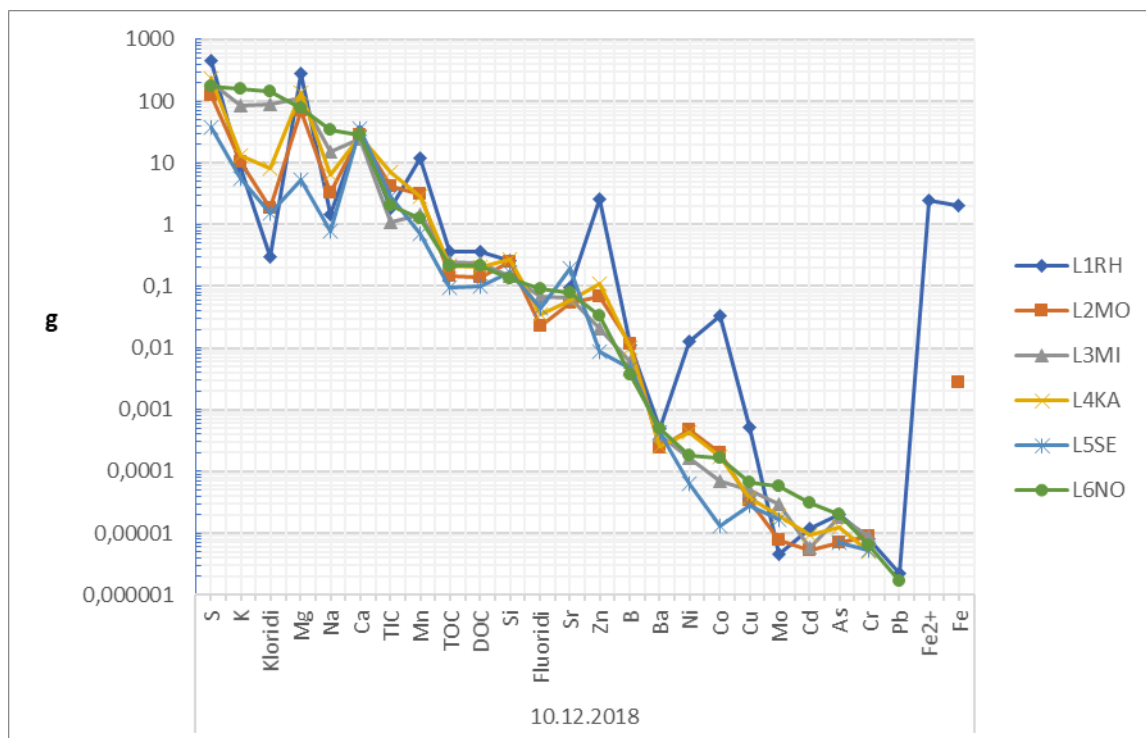
Kuva 35. Maaliskuun analyysien perusteella lasketut liuenneiden aineiden kokonaismassat grammoina 26.7.-7.3.2018 välisenä aikana logaritmisessa asteikossa. Syyskuun näytteenottokierroksella (kokeen kesto 14 kk) alumiinin ja fosforin pitoisuudet alittivat analyysirajat, eikä niitä ole kuvassa 36. Mangaanin liuenneet massat olivat edelleen korkeimmat lysimetreissä L1RH ja L2MO, mutta ero kalkkituotteita sisältäviin lysimetreihin ei ollut niin selkeä kuin maaliskuussa. Sinkin, nikkelin ja koboltin liuenneet massat olivat suurimmat lysimetreissä L1RH ja L2MO. Näistä rakenteista liukeni myös eniten rautaa. Kloridin liuenneet massat olivat suurimmat lysimetreissä L5NO ja L3MI. Lysimetri L5NO erottui myös suuremmilla kalium-, natrium-, koboltti, arseeni-, kadmium- ja molybdeenimäärillä.

Alkuaineraudan määritysrajan alitti ainoastaan lysimetristä L5SE suotautunut vesi. Eniten rautaa liukeni lysimetristä L1RH. L2MO lysimetristäkin liukeni noin 10-kertaisia

määriä rautaa verrattuna rakenteisiin, joissa käytettiin kalkkipeittoja. Lysimetristä L5SE liukeni eniten strontiumia ja kalsiumia.



Kuva 36. Syyskuun analyysien perusteella lasketut liuenneiden aineiden kokonaismassat grammoina 9.8.-10.9.2018 välisenä aikana logaritmisessa asteikossa Joulukuun analyyseissä (kokeen kesto n. 17 kk) (kuva 37) liuenanut rauta ylitti analyysirajat ainoastaan lysimetreissä L1RH ja L2MO. L1RH erottui myös selkeästi suurimmilla liuenneilla massoilla magnesiumia, mangaania, sinkkiä, nikkeliä, kobolttia, kuparia. Liuenneet kalsiummäärät olivat lähellä toisiaan kaikissa lysimetreissä. Liuenneet kalium-, kloridi-, natrium-, molybdeeni- ja kadmiummäärät olivat korkeimmat lysimetristä L6NO. Myös arseenia liukeni eniten tästä koerakenteesta, joskin ero muihin lysimetreihin on pieni. Mittauksen perusteella lysimetrien L2MO ja L4KA vesien analyytitulokset muistuttivat selvästi toisiaan mm. kaliumin, mangaanin, sinkin, boorin, nikkelin ja kuparin määrissä.



Kuva 37. Joulukuun analyysien perusteella lasketut liuenneiden aineiden kokonaismassat grammoina 16.10.-10.12.2018 välisenä aikana. Logaritmisessa asteikossa

5.3.5 Pohdintaa erojen syistä ja mekanismeista

Ksantaatteja käytetään metallisulfidien kerääjänä ja ne pääosin päätyvätkin rikasteeseen. Rikastushiekkaan voi kuitenkin päätyä ksantaattijäämiä. Pyhäsalmen kaivoksella käytetään vaahdotuksessa natrium-isobutyryliksantaattia ($(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{OCS}_2\text{Na}$) (Kauppila ym. 2011). Lisäksi rikastusprosessissa käytetään pH:n säätöön rikkihappoa (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2008). Rikastushiekka-lietteeseen sekoitetaan ennen altaalle pumppaamista kalkkia, ja rikastushiekka-altaan veden tavoite-pH on 10 (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2007). Käytetyt kemikaalit huuhtoutuvat ensivaiheessa rikastushiekan pinnasta todennäköisesti nopeammin kuin itse mineraalit rapautuvat. Nämä saattavatkin näkyä tämän työn testeissä korostuneesti, esimerkiksi hyvin samankaltaisina rikki- ja kalsiumpitoisuuksina. Myöskään todennäköisesti osittain ksantaattiperäisissä hiilipitoisuuksissa suuria eroja ei havaittu, lukuun ottamatta

lysimetrejä, joiden läpi virtasi enemmän vettä, joissa havaitut pitoisuudet olivat pienemmät.

Kalkkimateriaalin käyttö peittona on todettu pienentävän sinkin ja kadmiumin liikkuvuutta pelkkää maapeittoa paremmin (Zhang ym. 2016). Kadmiumin osalta tässä työssä ei havaittu positiivista vaikutusta verrattuna esimerkiksi moreenipeittoon tai peittämättömään rikastushiekkaan, mutta analyysitulosten keskiarvojen perusteella kalkkimateriaaleja sisältävien peittojen raudan, mangaanin, sinkin, nikkelin ja koboltin liukoiset pitoisuudet olivat keskimäärin selkeästi pienempiä. Erot moreenipeittoon vaikuttivat kuitenkin laskennallisten liuenneiden massojen perusteella pienenevän kokeen edetessä.

Metallit voidaan luokitella redox-olosuhteiden muutokselle herkkiin ja ei-herkkiin. Muutokselle herkkien metallien hapetusaste voi muuttua yleisesti luonnossa tai vesien käsittelyssä esiintyvissä olosuhteissa. Hapetusasteen muuttuessa myös liukoisuus voi muuttua merkittävästi. Redox-muutokselle herkkiin metalleihin voidaan luokitella esimerkiksi kromi, kupari, rauta, mangaani, elohopea, molybdeeni, tallium, uraani ja vanadium. Molybdeeniä vanadiumia ja uraania lukuun ottamatta liukoisuuksilla on taipuisuus suurentua pelkistävässä oloissa. Redox-muutoksille herkkät metalloidit arseeni ja seleeni käyttäytyvät molybdeenin, vanadiumin ja uraanin kanssa vastaavasti: ne ovat useimmiten liukoisempia hapettavissa oloissa. Redox-muutokselle vähemmän herkkiä ovat alumiini, barium, kadmium, lyijy ja nikkeli. Ne eivät muodosta veden kanssa niin helposti heikosti liukenevia hydroksideja. Kuitenkin muutokselle herkkien muiden aineiden, (kuten rikin) läsnä ollessa, niiden yhdisteiden liukoisuus saattaa olla redox-muutokselle herkkä. (Weiner 2012) Tässä työssä rikkiä oli kaikkien lysimetrien vesissä, joten myös redox-olosuhteiden muutokselle vähemmän herkkien liukoisuus saattoi muuttua muuttuvien rikkiyhdisteiden myötä. Redox-kenttämittausten tulokset kuitenkin heiluivat niin paljon, että niiden perusteella ei voitu selittää lysimetrien välisiä eroja. Myöskään vahvoja korrelaatioita laboratoriossa mitattujen redox-arvojen ja eri alkuaineiden liukoisten pitoisuuksien välillä ei löytynyt.

Metallien luokitteluun voidaan käyttää myös niiden Lewis-happo käyttäytymistä (kuva 38). Lewis-happona voi toimia yhdiste, jolla on positiivinen kokonaisvaraus, eli se voi ottaa vastaan elektronin. Helposti polarisoituvia, suuria ioneja kutsutaan pehmeiksi ja heikosti polarisoituvia pieniä ioneja koviksi. Kovaan luokkaan kuuluvat suosivat yhdisteissään kovia emäksiä ja usein kyseessä on ionisidos. Pehmeät suosivat pehmeitä ja kovalenttiset sidokset ovat yleisempiä. Keskikovien tai väliin jäävien metallien käyttäytymistä on vaikeampaa arvioida ja ne muodostavat suhteellisen pysyviä yhdisteitä sekä pehmeiden, että kovien emästen kanssa. (Duffus 2002) Kalkkituotepeittojen liuenneita pitoisuuksia vähentäneet vaikutukset sijoittuvat keskikovan ryhmän alkuaineisiin (Fe, Mn, Ni, Co, Zn). Kuparilla, lyijyllä tai kromilla merkittävää pitoisuuksien pienenemistä ei ollut kuitenkaan havaittavissa. Kuparin ja lyijyn osalta tätä voi selittää pehmeään luokkaan luokitellut spesiekit Cu(I) ja Pb(II).

		A-luokka (kova)																He
H		B-Luokka (Pehmeä)																
		Keskikova																
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe(III)	Co	Ni	Cu(II)	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
							Fe(II)			Cu(I)								
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La - Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb(IV)	Bi	Po	At	Rn	
													Pb(II)					
Fr	Ra	Ac - Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	

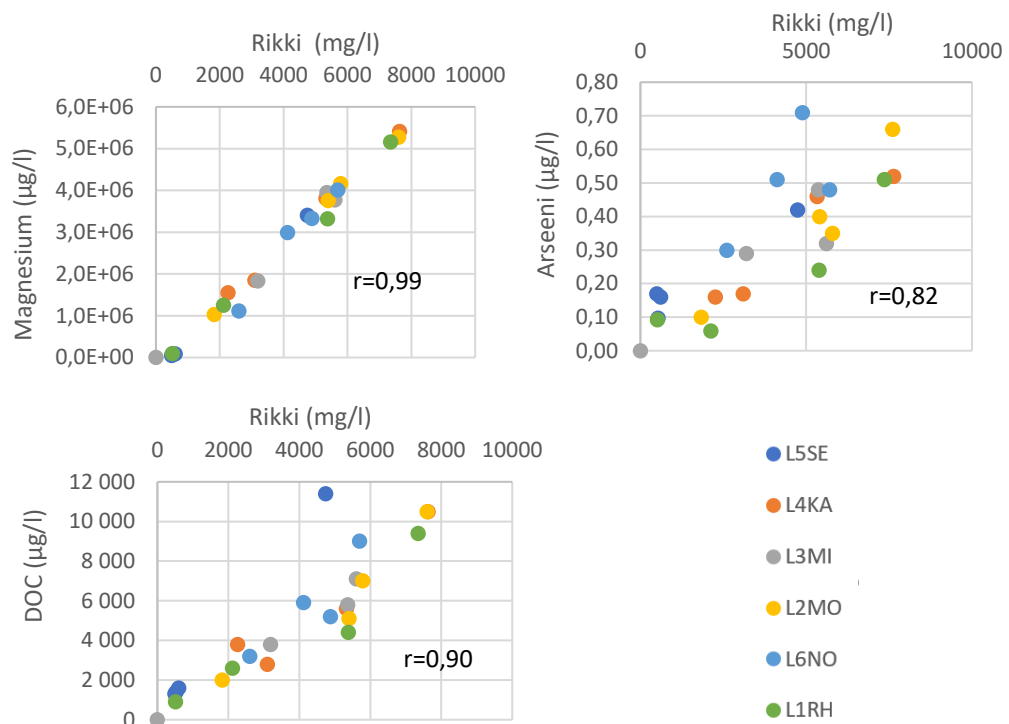
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Kuva 38. Metallien luokittelu koviin (sininen), pehmeisiin (oranssi) ja keskikoviin (vihreä) (Muokattu mukaillen Duffus 2002)

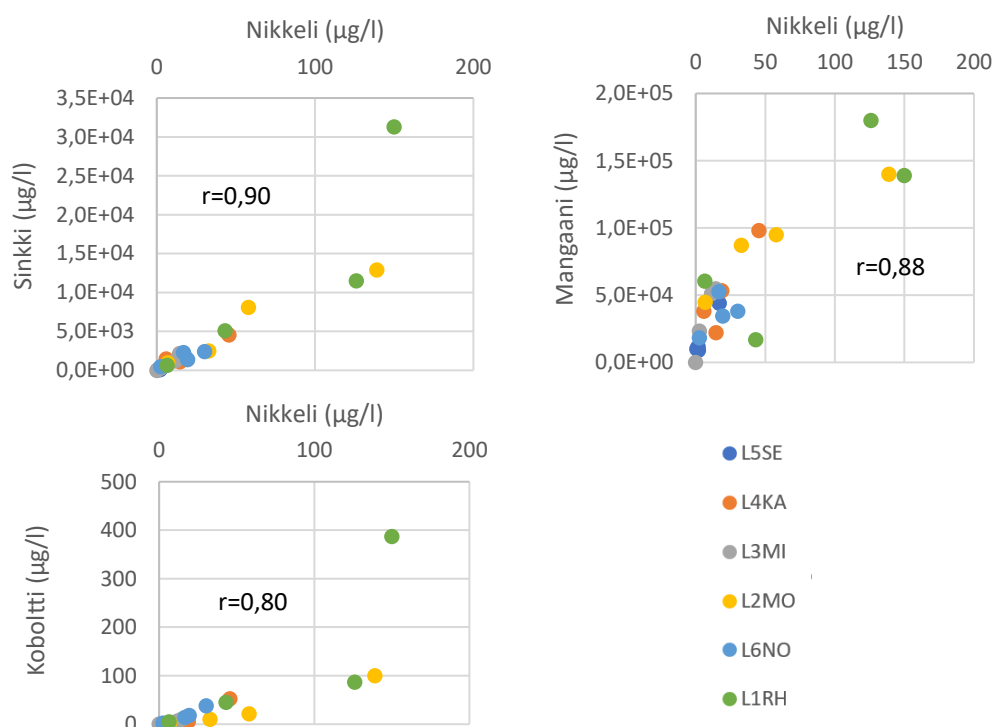
Poltetun ja sammutetun kalkin käyttämisen jo hapettuneiden rikastushiekköjen neutralointiin on huomattu liuottavan kalsiitin käyttöä enemmän jorasiitteja, minkä yhteydessä on mitattu myös kohonneita kalium- ja natriumpitoisuuksia verrattuna

kalsiitin käyttöön (Catalan & Yin 2003). Jarosiitteja ei kuitenkaan havaittu Pyhäsalmen rikastushiekassa (Heikkinen & Toropainen 2006). Muodostuva Fe(III)- tai alumiinisakka saattaa pienentää veden hivenmetallikonsentraatioita (esimerkiksi As, Pb, Cu, Zn, Cd, Co, Ni, tai Mn) yhteissaostuksen tai sorption myötä (España. 2007). Mikäli erilaiset hapettumisen välituotteet liukenevat korkeammassa pH:ssa, voivat korkeammat hivenmetallipitoisuudet selittyä niiden yhteyteen sitoutuneiden hivenmetalleiden mobilisoitumisella. On myös mahdollista, että osittain palaneesta kalkista (lysimetri L5SE ja L6NO) liukenee joitain metalleja. Kuitenkin esimerkiksi kadmiumin liukoisuuden erot lysimetrien L6NO ja L4KA välillä lysimetritesteissä ovat ristiriidassa materiaalit-osiossa esitettyjen liukoisuustestien kanssa, jossa kadmiumin analyysirajat eivät ylittyneet millään materiaalilla. Myöskään maanparannukseen käytettäviltä aineilta vaadittavan säännöllisen analysoinnin yhteydessä kohonneita kadmiumpitoisuuksia ei ole havaittu (Holm 2019).

Eri aineiden liukoisten pitoisuuksien suurimpia löydettyjä korrelaatioita kaikkien lysimetrien mittauksissa on tarkasteltu kuvissa 39 ja 40. Aineiden liukoisten pitoisuuksien väliset korrelaatiot saattavat viitata esimerkiksi yhteisiin reaktiopolkuihin tai korreloivien aineiden veteen liukeneviin yhdisteisiin. Esimerkiksi arseenin on todettu Pyhäsalmen rikastushiekassa olevan sitoutuneen sulfidimineraaleihin (Heikkinen & Toropainen 2006). Kuvassa 40 näkyvät rikin pitoisuuksien suhteellisen vahvat korrelaatiot magnesiumin, arseenin ja liunneen orgaanisen hiilen kanssa. Arseenin tapauksessa lysimetri L6NO vaikuttaa poikkeavan selkeästi muista lysimetreistä suuremmilla arseenipitoisuuksilla verrattuna rikkipitoisuuksiin. Orgaanisen hiilen ja rikin korrelaatio viittaa siihen, että myös mitatut liunneet rikkipitoisuudet ovat ainakin osittain ksantaattiperäisiä. Nikkelin pitoisuudet korreloivat melko vahvasti sinkin, mangaanin ja koboltin kanssa. Näistä kuvista erottuvat lysimetrit L2MO ja L1RH parilla selkeästi muita suuremmalla tuloksella.



Kuva 39. Rikin liukoisten pitoisuuksien korrelaatio magnesiumin, arseenin ja orgaanisen hiilen liukoisten pitoisuuksien kanssa



Kuva 40. Nikkelin liukoisten pitoisuuksien korrelaatio sinkin mangaanin ja koboltin liukoisten pitoisuuksien kanssa

5.4 Taloudellinen tarkastelu

Tässä työssä tutkituille peittoratkaisuille tehtiin taloudellinen tarkastelu antamaan suuntaa eri ratkaisujen kustannuksista. Tarkastelussa on huomioitua ainoastaan materiaalien hinnat ja kuljetuskustannukset Röyttän kalkkitehtaalta Pyhäsalmen kaivokselle. Lisäksi kuljetuskustannukset perustuvat arvioon, ja saattavat muuttua merkittävästi, mikäli saadaan järjestettyä esimerkiksi meno-paluu kuljetuksia. Huomioitujen kustannusten lisäksi tulevat rakentamiskustannukset koostuisivat materiaalien levittämisestä ja tiivistämisestä. Lisäksi seospeiton (lysimetri L5SE) tapauksessa Kalkmix Normal-materiaalia on suunniteltu sekoitettavan rikastushiekkaan traktorilla kyntämällä.

Taloudellisessa tarkastelussa on huomioitu B-altaan pohjoisosan ja D-altaan peittäminen. Taulukkoon 4 on kerätty peitettävien altaiden pinta-alat (Hänninen 2017) ja niiden

perusteella lasketut materiaalimenekit kalsiitti-, Mild- ja Normal -peitoille (80 cm) (lysimetrit L4KA, L2MI ja L6NO) ja seospeitolle (15cm) (lysimetri L5SE). Tämän lisäksi kaikki peitot tarvitsisivat vähintään 20 cm kerroksen moreenia kasvukerrokseksi, jonka kustannuksia ei ole sisällytetty peittojen yksikköhintoihin.

Taulukko 4. Materiaalimenekki Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-altaiden peitossa

Peitettävä osa	Laki [ha]	Luiska [ha]	Yhteensä [ha]	Materiaalin kulutus (80cm kerros) [m ³]	Materiaalin kulutus (15 cm kerros) [m ³]
B-altaan pohjois-osa	16,5	5,5	22	176000	33000
D-allas	22	8	30	240000	45000
Yhteensä	38,5	13,5	52	416000	78000

SMA Mineralilla on arvioitu Rapakon opinnäytetyöhön (2016) materiaalin kuljetuskustannuksia rekkarahdilla taulukon 5 mukaisesti. Lisäksi on arvioitu materiaalien hintahaarukkaa, johon taulukko 6 perustuu. Taulukkoon 6. on kuitenkin lisätty arvioitu 1€/t seulomiskustannus, sillä työn rakenteissa on käytetty 0-5 mm raekoon materiaaleja 0-15 mm sijasta.

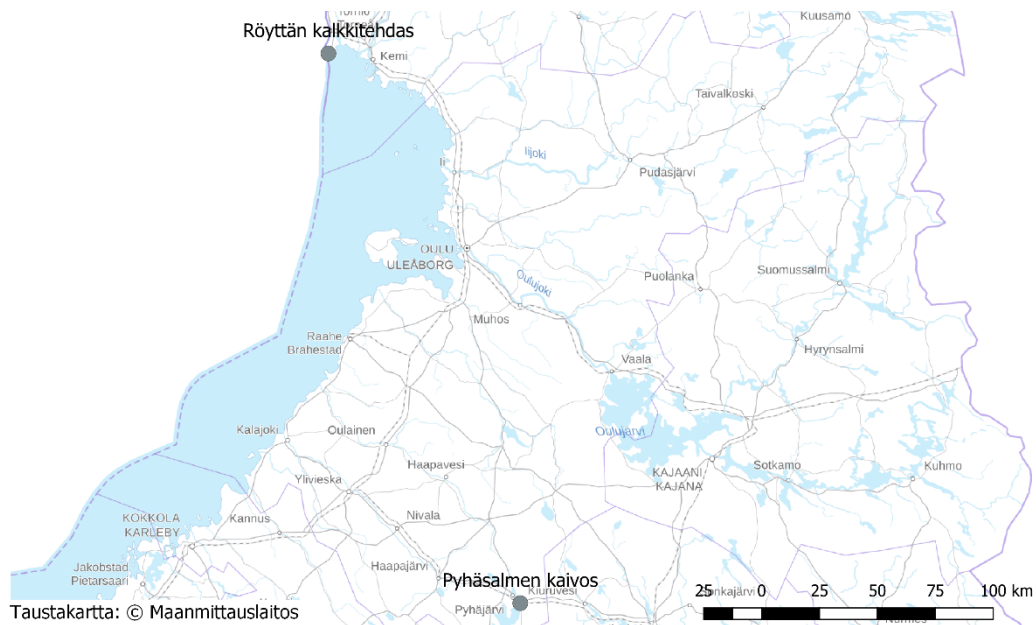
Taulukko 5. Etäisyys ja kuljetuskustannus rekkarahdille (Rapakko 2016)

Etäisyys [km]	Hinta [€/t/km]
30	5-7
100	9-11
150	11-14
350	20-24

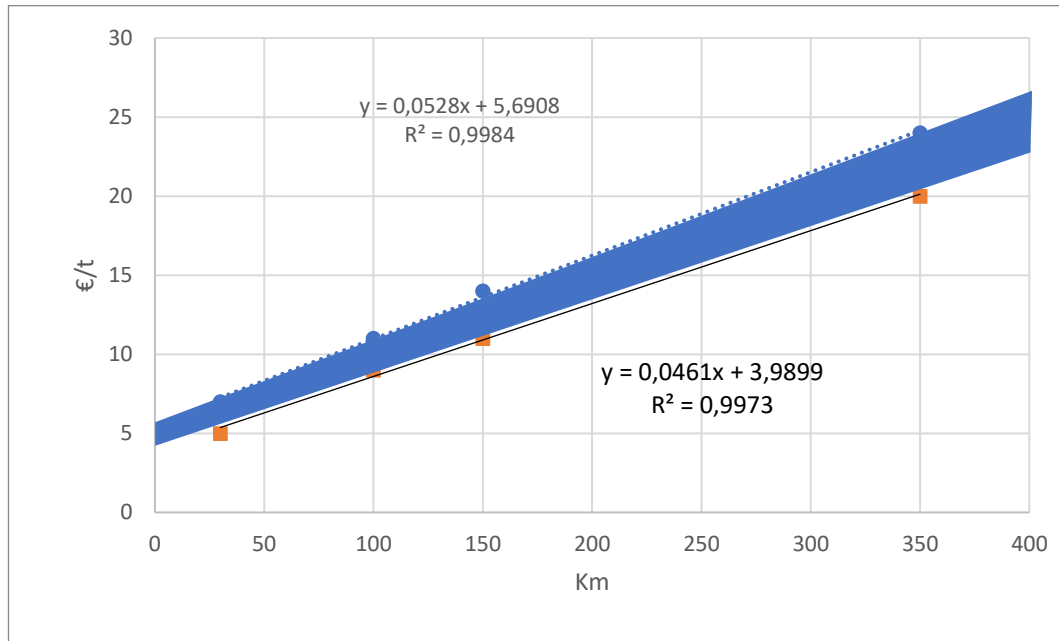
Taulukko 6. Kalkkituotteiden arvioidut hinnat sisältäen arvioidut seulantakustannukset

Tuote	Hinta [€/t]
Kalkmix Normal	5-8
Kalmix Mild 0-5 mm	2-4
Kalsiitti 0-5 mm	3-6

Etäisyys SMA Mineralin Röyttän kalkkitehtaalta Pyhäsalmen kaivokselle on 303km. Kohteiden sijainnit on esitetty kuvassa 41. Kuljetuskustannuksia on interpoloitu vastaamaan etäisyyttä käyttämällä kuvassa 10 esitettyjä yhtälöitä.



Kuva 41. Karttakuva SMA Mineralin kalkkitehtaan ja Pyhäsalmen kaivoksen sijainneista



Kuva 42. Kuljetuskustannusten ja etäisyyden suhteen arvioidut vaihteluvälit

Tilavuudet on muutettu laskelmissa tonneiksi käyttämällä Proctor-kokeiden perusteella arvioitua tiheyttä $2,2 \text{ t/m}^3$. Käyttämällä 303 km kuljetusta vastaavaa tonnihilintaa saadaan 15 cm peittokerroksen kokonaiskuljetuskustannuksiksi kuorma-autoilla noin 3,1-3,7 miljoonaa euroa ja 80 cm peitolle vastaavasti 16-20 miljoonaa euroa ja kokonaiskustannuksiksi Kuljetuskustannusten yksikköhinnaiksi neliötä kohden muodostuisi siten $5,9\text{-}7,2 \text{ €/m}^2$ 15 cm peitolle ja $32\text{-}38 \text{ €/m}^2$ 80 cm peittokerrokselle vastaavasti. Materiaalin yksikkö hinnat ja kuljetuskustannukset neliötä kohden on kerätty taulukkoon 7. Kuljetusten ja materiaalien kustannushaarukka koko peitettävälle alueelle olisi 4-27 miljoonaa euroa.

Taulukko 7. Peittojen yksikkökustannukset materiaali ja kuljetuskustannusten perusteella ilman rakennuskuluja

Peitto	Materiaalikustannukset €/m ²	Kuljetuskustannukset €/m ²	Yhteensä €/m ²
Kalsiitti 0-5 (80 cm)	5,3-10,6	31,6-38,2	36,9-48,7
Mild 0-5 (80 cm)	3,5-7	31,6-38,2	35,1-45,2
Normal (80 cm)	8,8-14,1	31,6-38,2	40,4-52,3
Normal (15 cm)	1,7-2,6	5,9-7,2	7,6-9,8

Suurimman täysperävaunuyhdistelmän (76 t) hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen tonnikilometriä kohden on täydellä kuormalla maantieajossa arvioitu olevan 28 g ja vastaavasti täydellä kuormalla ajavan dieselkäyttöisen malmijunan hiilidioksidiekvivalenttipäästöiksi tonnikilometriä kohden on arvioitu 10,2 g (Lipasto päästötietokanta 2017). Mikäli päästöjen oletetaan korreloivan suoraan käytetyn polttoainemäärän kanssa, polttoainekustannukset rautatiekuljetuksella olisivat noin 64% pienemmät. Rautatiekuljetuksella päästäisiin todennäköisesti merkittäviin kuljetuskustannusten säästöihin verrattuna esitettyihin laskelmiin.

Paikanpäältä saatava moreeni välttyy lähes kokonaan tässä tarkastelussa esitetyiltä kustannuksilta, sillä materiaalille ei tule juurikaan kuljetuskustannuksia tai hintaa. Rakentamisen kustannukset eivät todennäköisesti juurikaan muutu riippumatta mitä maamateriaalia käytetään. Tarkastelun perusteella huomataan, että rakenteen paksuuden vaikutukset kokonaiskustannuksiin ovat merkittävät ja suoraan verrannolliset käytettävän materiaalipaksuuteen.

6 POHDINTA

Pilot-skaalan kokeina lysimetrit tarjoavat laboratorio-olosuhteita realistisempia tuloksia, mutta niiden skaalaaminen ylöspäin toteuttamiskelpoisiin rakenteisiin sisältää epävarmuuksia. Esimerkiksi tässä työssä saavutettujen tiivistysasteiden toteuttaminen konsolidoituvan rikastushiekkapatjan päälle saattaa tuottaa ongelmia. Lisäksi tässä työssä tarkasteltiin 90 cm paksuisen rikastushiekkapatjan peittämisen vaikutuksia verrattuna todellisessa tilanteessa olevaan useiden metrien paksuisen rikastushiekkapatjaan. Tätä toisaalta kompensoi se, että alkuvaiheessa paksunkin rikastushiekkapatjan hapettuminen alkaa yleensä pinnasta rintaman siirtyen hitaasti syvemmälle. Työhön on pyritty keräämään materiaalit niin, että ne kuvaavat saatavilla olevia materiaaleja mahdollisimman hyvin. Kuitenkin todellisiin peittorakenteisiin tarvittavien materiaalien määrä on niin suuri, että rakentamisaikaista laadunvalvontaa tarvitaan riittävän tasalaatuisen materiaalin varmistamiseksi.

Työssä käytetyt koerakenteet eivät sovellu erityisen hyvin rakennettavan peiton vedenjohtavuuden arvioimiseen kerätyn veden määrää seuraamalla, sillä pintavalunnan vaikutus jää koerakenteissa huomioimatta. Erot suotautuneissa määrissä johtuvat siis 10 cm maanpinnan yläpuolella olevan reunuksen takia pelkästään haihtumiselle saatavilla olevasta vedestä. Lisäksi vedenpinnan mittaukset suoritettiin tiheimmilläänkin noin kahden viikon välein suoritettujen kenttämittausten yhteydessä. Niiden tiheys ei riitä arvioimaan yksittäisen sateen vaikutusta pintoihin systeemin nopeuden arvioimiseksi.

Maanpinnan suhteen syvemmällä olevat täyttöpinnat rikastushiekka- ja seospeiton tapauksessa heikentävät vertailukelpoisuutta näiden ja muiden peittorakenteiden välillä, sillä syvemmällä oleva pinta vähentää todennäköisesti haihduntaa. Pinnat molemmissa lysimetreissä ovat myös ensimmäisen reunavirtausta estävien kauluksen alapuolella, mikä vaarantaa lysimetrit reunavirtaukselle. Lysimetrien L1RH ja L5SE ylimmän peittokerroksen pinnat ovat muista lysimetreistä eroavalla korkeudella, koska lysimetrien muovikaivoja tilattaessa kaikki tutkittavia koerakenteita eivät olleet vielä päätetty ja kaikki

muovikaivot tilattiin samanlaisina yksinkertaisuuden vuoksi. Lysimetrejä täytettäessä priorisoitiin yhteneviä täyttöpintoja tärkeämmäksi vertailukelpoinen rikastushiekan määrä kaikkien lysimetrien välillä. Rakennettaessa lysimetrejä muovikaivon olisi kuitenkin voinut leikata matalammaksi ja upottaa reunan vastaavalle tasolle muiden lysimetrien kanssa.

Talven ja routimisen vaikutuksia peittorakenteiden vedenjohtavuuksiin ei voitu arvioida, sillä ensimmäisen kerran vettä keruukaivoissa huomattiin 30.11.2017 ja ensimmäiset kenttämittaukset suoritettiin 1.12.2017. Ihanteellisissa oloissa projekti olisi käynnistynyt niin, että koerakenteiden rakentaminen käynnistyisi välittömästi lumen sulamisen jälkeen ja rakentaminen olisi valmistunut jo keväällä. Näin koko kesän sademäärän vaikutusta vedenpintoihin ja veden laatumittauksiin olisi voitu kartoittaa. Sen jälkeen talven aikana tapahtuvia roudan aiheuttamia muutoksia olisi voinut paremmin arvioida seuraavan kesän datan pohjalta. Myös materiaalien kostuttaminen koerakenteita rakennettaessa olisi todennäköisesti nopeuttanut veden suotautumista.

Keruukaivoja olisi voitu kehittää säilyttämään veden paremmin siinä tilassa, mitä se on juuri suotautumisen jälkeen. Mahdollisesti hapettuminen keruukaivossa vähenisi sadevesikaivojen ilmatilavuutta pienentämällä ja tekemällä kaivoista kaasutiiviit, esimerkiksi vain toiseen suuntaan hengittävällä venttiilillä, joka sallisi veden virtauksen sisään päästämällä ilmaa ulos. Kaasujen mittaus voisi antaa lisätietoja koerakenteissa tapahtuvista reaktioista. Erään yksinkertaisen kaasukeräimen periaatteena on ohutseinäisessä silikoniputkessa olevan kaasun pitoisuuksien tasaantuminen ympäröivien olosuhteiden, esimerkiksi veden pitoisuuksien kanssa. Keräimet voidaan rakentaa niin; että kaasunpitoisuuksia saadaan useilta eri syvyyksiltä. Ajatus keräimien käytöstä tätä työtä ajatelleen tuli kuitenkin liian myöhään ja kairaamalla asentaminen todennäköisesti häiritsisi koerakenteiden tiiviyttä merkittävästi. Rakennusvaiheessa keräimien asentaminen ja rakentaminen ei lisäisi merkittävästi kustannuksia, sillä kaasunkeräimet voidaan rakentaa yleisesti saatavilla olevista edullisista materiaaleista.

Rikastushiekan neutralointiin käytetty sammutettu kalkki riitti kokeen ajan pitämään suotautuvan veden lähellä neutraalia ($\text{pH} > 6$) niin peittämättömän rikastushiekan kuin muidenkin peittorakenteiden tapauksissa ja tämän vuoksi veden laatu pysyi kokeen ajan suhteellisen hyvänä verrattuna luonnon taustaan tai talousveden laatuvaatimuksiin. Tämä luultavasti pienensi eroja lysimetrien veden laadun välillä. ABA-testien perusteella rikastushiekan neutralointipotentiaali oli matala ja on todennäköistä, että se kuluu loppuun jossain vaiheessa. Neutraloivan kyvyn loppuessa pH saattaa laskea merkittävästi, mikä lisää metallien liukenemista. Laskeva pH todennäköisesti kiihdyttää hapon tuottoa ja saattaa tarjota sopivat kasvuolosuhteet hapon tuottoa entisestään kiihdyttävälle rautaa ja rikkiä hapettaville bakteereille. Kirjallisuuden perusteella kuivapeitto hidastaa hapon tuottoa merkittävästi, muttei täysin pysäytä sitä. Kalkkituotteet voisivat toimia pitkäänkin tämän muodostuvan hapon neutraloijana pienentäen metallien liukoisuutta. Kokeen seurannan jatkaminen saattaisi tuoda tämän eron esille esimerkiksi moreenipeiton ja kalkkipeittojen välillä. Työn aikana kalkkituotteita sisältävien rakenteiden suotoveden pH pysyi keskimäärin 0,7 yksikköä peittämätöntä rikastushiekkaa ja 0,4 yksikköä moreenilla peitettyä rikastushiekkaa korkeammalla. Kirjallisuuden perusteella kalkkituotteiden käyttäminen peitossa saattaisi hidastaa myös hapon tuottoa, sillä ne hidastavat rautaa hapettavien bakteerien kasvua pitämällä pH:n niille epäsuotuisalla alueella. Tulosten perusteella on myös selvää, että taloudellisesti kannattava peitto ei voi perustua pelkkään neutraloivaan vaikutukseen vaadittavien suurten materiaalmäärien takia, vaan peiton on toimittava myös hapon kulkeutumisen estäjänä.

Suotoveden alkuainepitoisuuksien perusteella voidaan sanoa, että kalkkituotteiden käytöstä peitossa selvää hyötyä oli raudan, mangaanin, sinkin, nikkelin ja koboltin liukoisten pitoisuuksien pienentämisessä. Tarkasteltaessa yksittäisiä vesinäytteitä koerakenteissa liuenneiden aineiden kokonaismassat tukevat tätä, mutta erot esimerkiksi moreenipeittoon vaikuttivat pienenevän ajan edetessä. Huolimatta siitä, että poltettua kalkkia sisältävien materiaalien reaktiivisuus on oletettavasti suurempi, niiden toiminta ei poikennut merkittävästi muista. Nopeavaikutteisesta neutraloivasta kyvystä saattaisi olla enemmän hyötyä, mikäli pyrittiin hapettuminen kiihtyy merkittävästi.

Kalkkimateriaalin sekoittamisesta rikastushiekkaan vaikutti olevan hyötyä, sillä esimerkiksi pH pysyi stabiilina huolimatta vaihtelevista suotovesimääristä. Myös alkuainepitoisuudet olivat tässä lysimetrissä matalia muihin verrattuna, mutta on mahdotonta sanoa missä määrin erot johtuvat suuremmasta sulamisveden aiheuttamasta huuhtelusta.

Koerakenteiden jatkoseuranta tuottaisi lisätietoa hapettumisen nopeuden ja eri alkuaineiden liukoisuuksien kehittymisestä. Kun sulfidihapettuminen selkeästi käynnistyy, kenttämittaukset osoittaisivat pH:n laskua ja redoxin nousua. Lisäksi lisääntyneet liuenneet alkuaineet nostaisivat todennäköisesti sähkönjohtavuutta. Ensimmäisenä pitäisi reagoida se lysimetri, jossa on pelkkää rikastushiekkaa, sillä happi pääsee kulkeutumaan patjaan melko vapaasti. Tämä edellyttää kuitenkin keruukaivojen vesipinnan pitämistä pääosin alle 70 senttimetrin, jolloin rikastushiekkapatja olisi osittain kuivana (ei saturoituneena). Jatkoseuranta toisi mahdollisesti esille myös kalkkituotepeittojen ja moreenipeiton välisen eron hapettumisen käynnistymisnopeudesta, mikä voisi kasvattaa eroja metallipitoisuuksissa.

Kun lopulta todetaan, että veden laadun seurannalla ei saavuteta enää lisätietoa, tuottaisi rakenteiden purkaminen hyödyllistä lisätietoa. Esimerkiksi kalkki-rikastushiekkakerrosten rajapintaan on saattanut syntyä kova saoskerros, joka estää hapen kulkeutumista patjaan, kuten on syntynyt myös lentotuhkakerrosta käytettäessä. Mikäli tämän tyyppinen reaktio saataisiin luotua hallitusti, se voisi paikata estää peittorakenteen mahdollista halkeilua ja sen aiheuttamia oikovirtausreittien muodostumista. Yleensä rikastushiekkapatjan yläosa alkaa hapettua ensimmäisenä ja rintama etenee alaspäin. Purkamisen yhteydessä voitaisiin siis arvioida kunkin rikastushiekkakerroksen hapettumisen tilaa ja syvyyttä geologisella tarkastelulla. Tästä voidaan päätellä lisää hapettumisen nopeudesta ja sen eroista eri peittomateriaaleilla. Lisäksi saattaa löytyä jopa silmällä havaittavissa saattaa olevia hapen kulkeutumisen reittejä patjassa.

Rakenteiden purkamisen yhteydessä myös keruukaivojen pohjalle kertynyt sakka kannattaisi analysoida, sillä se täydentäisi kuvaa vertailtuna liukoisten aineiden

pitoisuuksiin. Sakan perusteella voidaan arvioida, aiheutuvatko eroavaisuudet liukoissa pitoisuuksissa alkuaineiden pidättymisestä rikastushiekkapatjaan vai saostumisesta keruukaivojen pohjalle. Tämä auttaisi edelleen arvioimaan, että mihin eri aineet todennäköisesti päätyvät täydessä koossa rakennettavan peiton tapauksessa.

Saturoituneiden vedenjohtavuuksien perusteella kalsiittipohjaiset kalkkituotteet eivät sovellu käytettäväksi ainoana peittorakenteena. Lysimetrien keskimääräisen vedenjohtavuuden tarkemman arvion saamiseksi suolakokeet saattaisivat olla kustannustehokas ratkaisu. Suolakokeessa suolavettä taustapitoisuudesta erottuvalla sähkönjohtavuudella kaadetaan rakenteiden pintaan ja sähkönjohtavuuden kehittymistä keruukaivossa seurataan. Tällä voitaisiin varmistua myös siitä, onko rakenteisiin syntynyt reunan lähelle keinotekoisia virtausreittejä tai muuta kanavoitumista. Toisaalta myös tarkempi keruukaivon pinnan seurauksena esimerkiksi keruukaivon pohjalle jätettävillä loggaavilla painemittareilla yhdessä tarkemman sademäärän mittauksen kanssa voisi tuottaa tietoa kerrosten dynamiikasta. Tätä tarkempaa dataa voitaisiin hyödyntää mallintamisessa ja siten paremmin arvioida koerakenteiden toimivuutta todellisissa mittasuhteissa.

Taloudellisen tarkastelun perusteella materiaalien kuljetuskustannukset muodostavat merkittävän osan peiton kustannuksista. Tarkastelussa ei huomioitu rakentamisen kustannuksia, joiden arvioimiseksi tarvittaisiin lisätietoa vaadittavista konetyötunneista ja niiden hinnoista. Todennäköisesti eri maapeittojen välillä rakentamiskustannuksissa ei ole merkittäviä eroja, sillä työvaiheet koostuvat kaikissa pääosin levittämisestä ja tiivistämisestä. Kuljetuskustannuksia pystytään todennäköisesti pienentämään merkittävästi hyödyntämällä junakuljetusta.

Tulosten perusteella sivutuotteiden käyttämistä kannattaisi tutkia suotaaviksi suunniteltujen rakenteiden, kuten kalkkikivisuodattimien tai patojen rakentamisessa, mikäli suolaisuutta lisäävistä kloridi- natrium ja kaliumpitoisuuksista ei ole haittaa. Lisäksi kalkkituotteiden käyttäminen esimerkiksi monikerrospeittojen kapillaarikatkossa tai kuivatuskerroksessa saattaisi parantaa vesien laatua. Näihin 0-15 mm

raekokojakauman kivi saattaisi soveltua ilman seulomista. Suomessa on 53 käytöstä poistettua ja hylättyä kaivannaisjätealuetta yhteensä 37:ssä eri kaivoksessa, joista mikään ei aiheuta suuronnettomuuden vaaraa, mutta 19 niistä on potentiaalisesti happoa tuottavia (Haavisto ym. 2013). Mikäli näissä suljetuissa kaivoksissa huomataan, että lisätoimenpiteitä tarvitaan, kalkkituotteiden käyttöä kannattaisi harkita ainakin, jos se on logistisesti kannattavaa.

Työn perusteella materiaalien käyttäytymisen mallintamiseksi koerakenteissa materiaaleille olisi hyvä teettää vedenpidätyskäyrän määritykset. Vedenpidätyskäyrää voidaan arvioida myös rakeisuuden perusteella, mutta siinä on omat epävarmuutensa. Lisäksi materiaalin koerakenteita suunniteltaessa tarvitaan todennäköisesti esimerkiksi materiaalien lujuusominaisuuksia, jotka olisi hyvä olla selvitettyinä materiaaleista.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Johtopäätökset tämän työn perusteella ovat tiivistetysti seuraavat:

- Rikastushiekan neutralointi ennen rikastushiekka-altaalle pumppaamista piti veden suhteellisen hyvälaatuisena kaikissa lysimetreissä, mikä todennäköisesti pienensi myös havaittuja eroja lysimetrien välillä.
- Kalkkituotteiden käytöstä oli hyötyä suotoveden laadun parantamisessa verrattuna moreenipeittoon (pH, Fe-, Mn-, Zn-, Ni-, Co-pitoisuudet)
- Kalkmix Mild-materiaalia tai testattua kalsiittia ei voi käyttää ainoana peittorakenteina, sillä mitatut saturoituneet vedenjohtavuudet olivat liian suuret
- Koko rikastushiekkamäärän neutralointi ei ole taloudellisesti kannattavaa, vaan peittorakenteiden on toimittava hapettumisen estäjänä
- Kalkkituotteiden käyttöä kannattaa harkita myös muissa kohteissa, joissa ongelmana on hapan valuma ja kohonneet metallipitoisuudet

Työn pohjalta nousseita lisätutkimustarpeita ovat:

- materiaalien vedenpidätyskyvyn ja lujuusominaisuuksien selvitys peittojen suunnittelun helpottamiseksi,
- koerakenteiden seuraamisen jatkaminen vedenlaadun kehittymisen arvioimiseksi, (erityisesti kalkituksen neutraloinnin riittävyys moreenipeitossa verrattuna kalkkipeittoihin) ja
- koerakenteiden purkamisen yhteydessä suoritettavat analyysit mm. keruukaivojen pohjalle kertyneestä sakasta pidätysmekanismien selvittämiseksi.

8 YHTEENVETO

Työssä testattiin Pyhäsalmen kaivoksen happoa tuottavan rikastushiekan peittoon seuraavista kalkkituotteista koostuvia peittoja (sulkeissa kemiallinen koostumus pääosin):

- Kalkmix Normal: Osittain palanut kalkki ulkovarastoinnista ($\text{CaO}+\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaCO}_3$)
- Kalkmix Mild: Kalsiittia seulottuna 0-5 mm raekokoon, jossa seassa poltetun kalkin tuotannosta kerättyä suodatinpölyä ($\text{CaO}+\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaCO}_3$)
- Alitekalsiitti seulottuna 0-5 mm raekokoon (CaCO_3)

Yhteensä rakennettiin kuusi lysimetriä, joihin jokaisen pohjalle asetettiin 90 cm rikastushiekkaa. Kalkkituotteista rakennettiin lysimetreihin neljä erilaista peittorakennetta peittämään rikastushiekkakerros. Kolmessa peittorakenteessa oli 80 cm kutakin kalkkituotetta ja päällä 20 cm moreenia kuvaamassa kasvukerrosta. Yhden lysimetrin peitto oli 15 cm kerros Kalkmix Normalia lapiolla seostettuna 15 cm kerrokseen rikastushiekkaa. Vertailukohdaksi näille rakenteille asetettiin metrin paksuisella moreenipeitolla peitetty rikastushiekka ja peittämätön rikastushiekkakerros.

Materiaaleille teetettiin vedenjohtavuuden testaus, joiden perusteella 0-5 mm raekoon Kalkmix Mildin ja 0-5 mm raekoon kalsiitin vedenläpäisevyydet ovat liian suuria (luokkaa 10^{-7} m/s) ainoina peittorakenteina. Vedenläpäisevyyttä pyrittiin myös arvioimaan vertaamalla kerätyn veden suhdetta sadedataan Tornion Torpista. Erot kerätyn veden määrissä olivat alussa huomattavia, mutta tasoittuivat ajan myötä. Tämä saattaa selittyä eroilla materiaalien rakennusaikaisissa kosteuksissa. Lisäksi koerakenteiden luonteesta johtuen erot sadeveden määrässä johtuvat ainoastaan haihtumiselle saatavissa olevan veden eroista.

Suotautuvia vesiä analysoitiin kenttämittauksin pH:n, Redoxin, sähkönjohtavuuden ja liuenneen hapen osalta. Työssä käsiteltiin kenttämittauksia aina 15 kuukauden päähän kokeen alkamista. Kalkkituotteita sisältävien peittojen suotoveden pH oli noin 0,4 yksikköä korkeammalla verrattuna moreenipeittoon, mutta myös moreeni piti pH:n neutraalina kokeen aikana. Seospeitossa pH vaihteli vähiten huolimatta vaihtelevasta suotovesimäärästä, mikä selittyy paremmalla kontaktilla hapettuvan kerroksen ja neutraloivan kerroksen kanssa. Kokeiden aikana kaikissa lysimetreissä suhteellisen korkeana pysynyt pH:ta selittää rikastushiekan kalkkikäsittely ennen rikastushiekaltaalle johtamista.

Sähkönjohtavuudessa oli suurta vaihtelua erityisesti peittämättömässä rikastushiekassa ja seospeitossa suotoveden määrän eroista johtuen. Muissa peitoissa sähkönjohtavuus pysyi korkealla tasolla verrattuna esimerkiksi talousveden suosituksiin. Peittämättömän rikastushiekan sähkönjohtavuus alkoi nousta syksyllä viitaten lisääntyneisiin liukoisiin pitoisuuksiin (eli elektrolyyttipitoisuuksiin). Myös redox-pitoisuuksissa vaihtelu oli suurta, erityisesti seospeiton tapauksessa. Merkittäviä johdonmukaisia eroja materiaalien redox-pitoisuuksissa ei havaittu kokeen aikana. Liuenneen hapen pitoisuuksissa ajallinen vaihtelu oli suurta, mutta keskimäärin enemmän happea oli kalkkipeittokerroksen sisältävistä koerakenteista suotautuneessa vedessä.

Laboratoriossa vesistä analysoitiin neljään otteeseen alkuainepitoisuuksia, ferrorauta (Fe^{2+}), kloridi, fluoridi ja hiilen määrityksistä TIC, TOC ja DOC. Suotautuneet vedet olivat Fickling-diagrammin mukaisesti luokiteltuna pääosin lähes neutraaleja ja korkeamettallisia. On kuitenkin hieman harhaanjohtavaa puhua korkeista metallipitoisuuksista useimpien metallien pitoisuuksien ollessa alle mg/l-luokkaa ja esimerkiksi talousveden laatuvaatimukset täyttäviä.

Konsentraatioiden keskiarvojen perusteella kalkkituotteiden käyttämisestä hyötyä on erityisesti mangaanin, sinkin, nikkelin ja koboltin liukoisten pitoisuuksien vähentämisessä. Analyysikerroittain tarkasteltujen liuenneiden massojen pitoisuudet tukevat tätä, mutta erot esimerkiksi moreenipeittoon vaikuttivat pienenevän ajan edetessä.

Vesien laadussa Lysimetrit L3MI ja L6NO erottuivat korkeissa kloridi- ja fluoridipitoisuuksissa verrattuna muihin peittoihin, mitkä ovat mitä todennäköisimmin peräisin käytetyistä kalkkimateriaaleista. Lysimetristä L6NO liukeni eniten natriumia, kaliumia ja hivenmetalleja (Cu, Cd, Mo, As, Cr, Pb). Hivenmetallipitoisuuksien keskiarvot alittivat kuitenkin talousveden laatuvaatimukset kaikissa koerakenteissa.

Maaperän reaktiot ovat hitaita ja kokeen puolentoista vuoden kesto on lyhyt verrattuna periaatteessa tuhansiksi vuosiksi suoritettavaan rikastushiekka-altaiden sulkemiseen. Pitkien koejärjestelyjen tekeminen on usein käytännön järjestelyjen ja esimerkiksi rahoituksen kannalta vaikeaa. Lisäksi tuloksia voidaan joutua odottamaan pitkään. Tässä työssä saatuja tietoja voidaan hyödyntää jossain määrin pitempiketoisten ympäristövaikutusten arviointiin ja sulkemisrakenteiden suunnitteluun. Mallintamalla lisäksi rikastushiekkan ja kalkkituotteiden geokemiallisia reaktioita ja peittorakenteiden käyttäytymistä erilaisissa hydrologisissa olosuhteissa, kuten kuivina kausina ja tulvakausina, voidaan arvioida ja vertailla eri materiaaleista tehtyjen peittorakenteiden pitkäaikaista toimivuutta. On kuitenkin muistettava, että mallien, kuten esimerkiksi säämallienkin, luotettavuus heikkenee mitä pidempiaikaisia ennusteita tehdään.

Happaman valuman ehkäisy ja käsittely on monimutkainen ongelma, jonka käsittelyyn tarvitaan tietotaitoa monelta eri alalta. Peittojen suunnittelu sisältää mm. hydrologiaa, geostatiikkaa ja geokemiaa. Tämän työn tuloksista parhaiten hyödynnettävissä ovat geokemialliset tulokset, joiden perusteella kalkkisivutuotteiden käyttöä kannattaa harkita myös muissa hapanta valumaa ja kohonneita metallipitoisuuksia sisältävissä kohteissa.

LÄHDELUETTELO

Agenais A., Aubertin M., Bussière B., Martin V. 2005, Large scale applications of covers with capillary barrier effects to control the production of acid mine drainage [verkkodokumentti] saatavissa:

https://www.researchgate.net/profile/Bruno_Bussiere/publication/229044657_Large_scale_applications_of_covers_with_capillary_barrier_effects_to_control_the_production_of_acid_mine_drainage/links/53d0e97e0cf2fd75bc5d517c/Large-scale-applications-of-covers-with-capillary-barrier-effects-to-control-the-production-of-acid-mine-drainage.pdf [viitattu 11.2.2019]

Al-Abed SR, Jegadeesan G, Purandare J & Allen D. 2008, Leaching behavior of mineral processing waste: Comparison of batch and column investigations. *J Hazard Mater* 153(3): 1088-1092.

Alakangas L & Öhlander B. 2006, Pilot-scale studies of different covers on unoxidised sulphide-rich tailings in Northern Sweden: The geochemistry of leachate waters. *Mine Water Environ* 25(3): 171-183.

Berg-Andersson B., Hernesniemi H, Rantala O, Suni P. 2011, Kalliosta kullaksi, kummusta klusteriksi, Suomen mineraaliklusterin vaikuttavuusselvitys, Taloustieto Oy, ISBN 978-951-628-526-2

Catalan J., Yin G., 2003, Comparison of Calcite to Quicklime for Amending Partially Oxidized Sulfidic Mine Tailings before Flooding, *Environ. Sci. Technol.* 2003, 37 (7), s. 1408-1413

Davis A, Eary LE & Helgen S. 1999 Assessing the Efficacy of Lime Amendment To Geochemically Stabilize Mine Tailings. *Environ Sci Technol* 33(15): 2626-2632.

Duffus JH. 2002, "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry 74: 793.

Eby N. 2004, Principles of Environmental Geochemistry, ISBN 0-122-29061-5

Embleton C. & Thornes J. (toim.) 1979, Process in Geomorphology ISBN 0-7131-6243-0

Eriksson N. 2016, Performance of the flooded TMF at Stekenjokk: 25 years of follow-up, 23rd Annual British Columbia-MEND ML/ARD Workshop [verkkodokumentti] saatavissa <http://bc-mlard.ca/files/presentations/2016-3-ERIKSSON-performance-of-flooded-TMF-Steckenjokk.pdf> [viitattu 20.1.2019]

España J. 2007, The Behavior of Iron and Aluminum in Acid Mine Drainage: Speciation, Mineralogy, and Environmental Significance. In: Anonymous : 137-150.

European Commission (EC) 2009, Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities, [verkkodokumentti] saatavissa: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf [viitattu 8.6.2018]

Fitts CR. 2013, 3 - Principles of Flow. In: Fitts CR (ed) Groundwater Science (Second Edition). Boston: Academic Press: 47-96.

Gaikwad RW. 2010, Review and Research Needs of Active Treatment of Acid Mine Drainage by Ion Exchange. Electronic Journal of Environmental, Agricultural & Food Chemistry 9(8): 1343-1350.

Gillis H., Nachtrieb N., Oxtoby D. 2002, Principles of Modern chemistry, Fifth edition, ISBN 0-03-035373-4

Gray NF. 1997, Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environ Geol* 30(1): 62-71.

Haavisto T., Niskala K., Silvola M., Räisänen M. 2013, Ympäristöministeriön raportteja 24 | 2013 - Suljettujen ja hylättyjen kaivosten kaivannaisjätealueiden kartoitus, [verkkodokumentti] ISBN 978-952-11-4216-1 saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/fi-FI/content/25033/1> [viitattu 8.3.2018]

Hakanpää A. (toim.) & Lappalainen P. (toim.), 2009, Kaivos ja Louhintatekniikka, Kaivannaisteollisuus ry, Opetushallitus, ISBN 978-952-13-3488-7

Heikkinen M. (toim.) & Väisänen T. (toim.) 2007, Pyhäjärven Junttiselän tila ja kunnostusmahdollisuudet, Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskuksen raportteja 7/2007 [verkkodokumentti] saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/43097/PPOr_7_2007.pdf?sequence=1 [viitattu 14.2.2019]

Heikkinen P. (toim.) & Noras P. (toim.), 2005, Kaivoksen sulkemisen käsikirja, Kaivostoiminnan ympäristötekniikka, ISBN 951-690-941-8

Heikkinen P., Toropainen V. 2006, Pyhäsalmen, Hituran, Talvivaaran ja Ihalaisen kaivosten sivukivien ja rikastushiekkojen mineraloginen ja kemiallinen koostumus, Arkistoraportti, GTK, S49/0000/2006/3

Herbert R. & Höglund L. (toim.) 2004, MiMi - Performance Assessment Main Report MiMi 2003:3 ISBN 91-89350-27-8

Hogan C. & Tremblay G. (toim.) 2001, MEND Manual Volume 4 - Prevention and Control, MEND 5.4.2d

Holm J. 2019, RE:Kadmiumin liukoisuus, Vastaanottaja: Juho Kinnunen. [yksityinen sähköpostiviesti] Lähetetty 21.1.2019

Hänninen M. 2017, RE: Rikastushiekan lähde ja pinta-rakennekokeiden nykytilanne, Vastaanottaja: Juho Kinnunen [yksityinen sähköpostiviesti] Lähetetty 16.10.2017

Ilmatieteenlaitos 2012, Ilmastollinen vertailukausi 1981-2010 [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi-1981-2010> [viitattu 9.5.2018]

INAP (The International network for acid prevention) 2004, The Global Acid Rock Drainage Guide, [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf> [viitattu 9.5.2018]

Joutti A., Laine-Ylijoki J., Vaajasaari Kati, Vestola E, Wahlström M. 2006, Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2006 [verkkodokumentti] saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BF83F4787-0B71-4C29-A4BE-8390DEEB036A%7D/37516> [viitattu 10.5.2018]

Jouttijärvi T. Nieminen S. 2018, Management of Waste from the Extractive Industries - the reference document on best available techniques (BREF) Esitys kaivosten ympäristönsuojelupäivillä 6.11.2018.

Karjalainen N., 2016, Uusiomateriaalien hyödyntäminen rikastushiekka-altaiden pintarakenteissa, Diplomityö

Karlsson T, Tornivaara A & Forsman P. 2018, Substitutive Cover Materials for Waste Rock Piles - a Lysimeter Study. (Posteri)

Kauppila. P., Räisänen. M. & Myllyoja. S. 2011, Metallikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011. [viitattu 16.2.2018] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY_29_2011.pdf?sequence

Lahermo P., Väänänen P., Tarvainen T., Salminen R., 1996, Osa 3: Ympäristögeokemia – purovedet ja -sedimentit, ISBN 951-690-678-8, Teoksessa: Suomen Geokemian atlas, ISBN 951-690-374-6

Larkins, C., Karlsson, T., & Kauppila, P., 2016, Design, construction, instrumentation, and monitoring of pilot scale waste rock cover systems: concept review and case studies Min-North Project, WP2, task 2.3.

Lottermoser B. (2010) Mine Wastes. DE: Springer Verlag.

Microsoft 2019, CORREL function [verkkodokumentti] saatavissa: <https://support.office.com/en-us/article/correl-function-995dcef7-0c0a-4bed-a3fb-239d7b68ca92> [viitattu 20.2.2019]

Nason P, Alakangas L & Öhlander B., 2013 Using sewage sludge as a sealing layer to remediate sulphidic mine tailings: A pilot-scale experiment, northern Sweden. Environ Earth Sci 70(7): 3093-3105.

Nordstrom D. Alpers C. 1999a, Geochemical modeling of water-rock interactions in mining environments, The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Chapter: 14, Publisher: Society for Economic Geologists, Editors: Plumlee GS, Logsdon MJ, s. 289-324

Nordstrom D. Alpers C. 1999b, Geochemistry of acid mine waters. The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Society of Economic Geologists, Littleton, CO (1999), s. 133-160 The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, 1999, Society of Economic Geologists

Nuorivaara T. 2015, Rikastushiekan ympäristöominaisuuksien parantaminen vaahdottamalla, Diplomityö

O'Kane Consultants Inc. 2012, MEND 1.61.5c– Cold Regions Cover System Design Technical Guidance Document

Pagnanelli F, Luigi M, Mainelli S & Toro L. 2007, Use of natural materials for the inhibition of iron oxidizing bacteria involved in the generation of acid mine drainage. *Hydrometallurgy* 87(1): 27-35.

Payant S. Yanful E. 1995, MEND 2.35.2B Evaluation of techniques for preventing acidic rock drainage [verkkodokumentti] saatavissa: <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/2.35.2b.pdf> [viitattu 11.2.2019]

Peinedrud E. 2003, MiMi – Water covers A literature review on subaqueous tailings disposal [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:995372/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 20.1.2019]

Plaza F, Wen Y & Liang X. 2018, Acid rock drainage passive remediation using alkaline clay: Hydro-geochemical study and impacts of vegetation and sand on remediation. *Sci Total Environ* 637–638: 1262-1278.

Plumlee G., Smith KS, Montour MR, Ficklin WH & Mosier EL. 1999a, Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types. *The environmental geochemistry of mineral deposits. Part B: case studies and research topics* 6: 373-432.

Plumlee, G. 1999b, The environmental geology of mineral deposits. *Reviews in Economic Geology*. 6A. s. 71-116.

Pohjois-Suomen Aluehallintovirasto 2017, Lupapäätös, Nro 74/2017/1 Dnro PSAVI/3467/2014 [Verkkodokumentti] Saatavissa: https://tietopalvelu.ahp.fi/Lupa/AvaaLiite.aspx?Liite_ID=3486493 [Viitattu 1.10.2018]

Pohjois-Suomen Aluehallintovirasto 2018, Lupapäätös, Nro 50/2018/1 Dnro PSAVI/1688/2018 [Verkkodokumentti] Saatavissa: https://tietopalvelu.ahp.fi/Lupa/AvaaLiite.aspx?Liite_ID=4476686 [Viitattu 1.10.2018]

Pohjois-Suomen Ympäristölupavirasto 2007, Lupapäätös, ASIA: Pyhäsalmen kaivoksen ympäristö- ja vesitalouslupa, Pyhäjärvi LUVAN HAKIJA: Pyhäsalmi Mine Oy, Nro 85/07/02, Dnro Psy-2004-y-199, [verkkodokumentti]. Saatavissa <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B894B5FE1-3E1C-4223-A0CC-08BC68BF9A60%7D/86841> [Viitattu 16.12.2017]

Pohjois-Suomen Ympäristölupavirasto 2008, Lupapäätös, 79/08/2 Dnro PSY-2008-Y-37 [Verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC99643A0-03AE-4579-AA42-D4FBE44F712B%7D/86711> [Viitattu 9.1.2018]

Pöyry 2016, Ympäristövaikutusten arviointiselostus: Rikastamon syötemäärän sekä NP-rikastushiekan varastointikapasiteetin kasvattaminen Kittilän kultakaivoksella [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B7D76EBE0-CC4B-4FFB-956D-9A6E229E4F3E%7D/123221> [viitattu 7.2.2019]

Quispe D, Pérez-López R, Acero P, Ayora C, Nieto JM & Tucoulou R. 2013, Formation of a hardpan in the co-disposal of fly ash and sulfide mine tailings and its influence on the generation of acid mine drainage. *Chemical Geology* 355: 45-55.

Räisänen M., Skinnari V. 2015, GTK:n Arkistoraportti: Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekan jätealueen ympäristön pintavesien kemiallinen nykytila vuonna 2006

[verkkodokumentti] saatavissa: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/63_2015.pdf [viitattu 10.9.2018]

Rapakko T. 2016, Opinnäytetyö: Kalkinpolton sivutuotteiden hyödyntäminen ja logistiikka, SMA Mineral Oy [verkkodokumentti] saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/116755/Rapakko_Timo.pdf?sequence=1 [viitattu 16.2.2019]

Rescan Environmental Services Ltd. 1989, Subaqueous Disposal of Reactive Mine Wastes: An Overview MEND Project 2.11.1a [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.11.1a.pdf> [Viitattu 14.1.2019]

Selinus O. 2003,12. Metal Flows and Environmental Impact. In: Anonymous : 356-383.

Sheoran AS & Sheoran V. 2006, Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. Minerals Engineering 19(2): 105-116.

Skousen J, Zipper CE, Rose A, Ziemkiewicz PF, Nairn R, McDonald LM & Kleinmann RL. 2017, Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. Mine Water and the Environment 36(1): 133-153.

Skousen J. 2017, A methodology for geologic testing for land disturbance: Acid-Base Accounting for surface mines. Geoderma 308: 302-311.

SMA Mineral, 2017, Röyttä [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://smamineral.se/fi/facility/roytta-3/> [viitattu 16.12.2017]

Søndergaard M. 2009, Redox Potential. Encyclopedia of Inland Waters: 852-859.

Soveri J., Peltonen K. 1996, Lumen ainepitoisuudet ja talviaikainen laskeuma Suomessa vuosina 1976—1993 [verkkodokumentti] Ympäristökeskus saatavissa:

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/183982/SY_6.pdf?sequence=1 [viitattu 14.2.2019]

Striggow B. 2013, Field Measurement of Oxidation-Reduction Potential (ORP), SESD Operating Procedure [verkkodokumentti] saatavissa: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/Field-Measurement-of-ORP.pdf> [viitattu 5.9.2018]

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2017, LIPASTO yksikköpäästötietokanta [verkkodokumentti] saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/> [viitattu 11.1.2019]

Välisalo T. (toim.) 2014, Ympäristöministeriön raportteja 2: Kaivosten stressitestit 2013 [verkkodokumentti] saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42780/YMra_2_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 7.2.2019]

Vanapalli S. Barbour L. O’Kane M. 1997, MEND 2.21.3 Review of Soil Cover Technologies for Acid Mine Drainage -A Peer Review of the Waite Amulet and Heath Steele Soil Covers [verkkodokumentti] saatavissa: <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.21.3.pdf> [viitattu 11.2.2019]

Weiner E. 2012, Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide, Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN-13:978-1-4398-5333-7

Wels C, MacG. Robertson A & Jakubick AT. 2000, A review of dry cover placement on extremely weak, compressible tailings. CIM Bull 93(1043): 111-118.

YSI 2001, Measuring ORP on YSI 6-Series Sondes: Tips, Cautions and Limitations [verkkodokumentti] saatavissa: <https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Technical%20Notes/T608->

Measuring-ORP-on-YSI-6-Series-Sondes-Tips-Cautions-and-Limitations.pdf [viitattu 6.9.2018]

Zhang W, Alakangas L, Wei Z & Long J. 2016, Geochemical evaluation of heavy metal migration in Pb-Zn tailings covered by different topsoils. *J Geochem Explor* 165: 134-142.

Zipper CE & Skousen JG. 2010, Influent Water Quality Affects Performance of Passive Treatment Systems for Acid Mine Drainage. *Mine Water and the Environment* 29(2): 135-143.

Liite 1 (1): Laboratorioanalyysien menetelmät, mittausepävarmuudet, määrittämissrajat ja yksiköt

Analyysi	Menetelmä	Mittausepävarmuus	Määrittämissraja	Yksikkö
*pH	SFS 3021:1979	± 0,2 pH yks,		
*Sähkönjohtavuus	SFS-EN 27888:1994	<2: ± 10% >2: ± 4%	1,0	mS/m
*Kloridi	SFS-EN ISO 10304-1:2009	<1: ± 20% >1: ± 10%	0,10	mg/l
TIC	SFS-EN 1484:1997	<5: ± 20% >5: ± 10%	0,5	mg/l
*TOC	SFS-EN 1484:1997	<1: ± 30% 1-5: ± 15% >5: ± 10%	0,5	mg/l
*DOC	SFS-EN 1484:1997	<1: ± 30% 1-5: ± 15% >5: ± 10%	0,5	mg/l
*Fluoridi	SFS-EN ISO 10304-1:2009	<0,5: ± 20% >0,5: ± 15%	0,20	mg/l
Red/Ox	sisäinen menetelmä			mV/l
Rauta, Fe ²⁺	ISO 6332:1988(E)		0,020	mg/l
*Alumiini, Al (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<0,1: ± 25% 0,1-1: ± 16% >1: ± 10%	0,03	mg/l
*Arseeni, As (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<1: ± 25% 1-10: ± 15% >10: ± 11%	0,25	µg/l
*Boori, B (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<10: ± 33% 10-25: ± 20% >25: ± 12%	2,5	µg/l
*Barium, Ba (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<10: ± 15% >10: ± 10%	1,5	µg/l
*Kalsium, Ca (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<1: ± 20% 1-5: ± 15% >5: ± 10%	0,05	mg/l
*Kadmium, Cd (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<0,3: ± 32% 0,3-10: ± 15% >10: ± 10%	0,05	µg/l
*Koboltti, Co (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<0: ± 25% 0-5: ± 12% >5: ± 9%	0,1	µg/l

Liite 1 (2): Laboratorioanalyysien menetelmät, mittausepävarmuudet, määrittämisrajat ja yksiköt

*Kromi, Cr (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<1: ± 30% 1-10: ± 15% >10: ± 10%	0,25	µg/l
*Kupari, Cu (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<1: ± 30% 1-10: ± 15% >10: ± 10%	0,25	µg/l
*Rauta, Fe (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<0,1: ± 25% 0,1-2: ± 13% >2: ± 10%	0,015	mg/l
*Kalium, K (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<2,5: ± 20% 2,5-10: ± 15% >10: ± 10%	0,5	mg/l
*Magnesium, Mg (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<0,5: ± 25% 0,5-2: ± 15% >2: ± 10%	0,025	mg/l
*Mangaani, Mn (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<5: ± 20% 5-25: ± 10% >25: ± 8%	1	µg/l
*Molybdeeni, Mo (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<1: ± 30% 1-5: ± 15% >5: ± 10%	0,25	µg/l
*Natrium, Na (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<5: ± 20% >5: ± 12%	0,25	mg/l
*Nikkeli, Ni (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<1,5: ± 30% 1,5-10: ± 15% >10: ± 10%	0,25	µg/l
*Fosfori, P (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<0,5: ± 20% >0,5: ± 10%	0,05	mg/l
*Lyijy, Pb (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<0,5: ± 25% 0,5-2,5: ± 15% >2,5: ± 10%	0,1	µg/l
*Rikki, S (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<1: ± 20% 1-10: ± 15% >10: ± 10%	0,25	mg/l
*Pii, Si (liukoinen)	SFS-EN ISO 11885:2009	<1,5: ± 17% >1,5: ± 12%	0,15	mg/l
*Strontium, Sr (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<5: ± 20% >5: ± 9%	0,5	µg/l
*Sinkki, Zn (liukoinen)	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<10: ± 30% 10-100: ± 15% >100: ± 10%	1	µg/l

*Menetelmä akkreditoitu

Liite 2 (1): Kenttämittausten tulokset

Lämpötila [°C]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
1.12.2017	4	3,7	4,1	3,6	3,9	3,6
13.12.2017	3,5	3,4	3,6	3,1	3,7	3,7
28.12.2017	2,5	2,4	2,3	2,9	2,5	3,2
25.1.2018	2	2,1	2,4	2,1	1,7	2,8
16.2.2018	2,1	2,3	2,3	2	2,4	2,1
12.4.2018				1,3	1,6	1,5
7.5.2018	0,9	1,5	2,1		1,3	0,9
22.5.2018	1,5	2,1	2,6	2,6	2,8	1,8
4.6.2018	3,2	3,7	3,8	3,8	3,9	3,5
4.7.2018	6,1	6,2	6,1	6,3	6	6,2
19.7.2018	7,5	8	7,6	7,1	7,6	7,8
3.8.2018	9,8	9,3	9,1	9,9	10	9,5
7.8.2018	10,1	10	9,9	10	10,3	9,9
13.9.2018	10,1	9,7	9,7	9,5	10	9,9
25.9.2018	8,8	9,2	9,1	9,1	9,5	9,3
9.10.2018	7,9	7,9	8	7,9	8,1	7,8
14.11.2018	5,4	5,6	5,4	5,7	5,7	5,4
26.11.2018	4,3	4,9	4,9	4,8	4,6	4,1
12.12.2018	3,9	3,4	4,4	3,7	4,8	4
Liuenanut happi (DO) [%]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
1.12.2017	66,2	62,5	64,3	71,4	46,3	74,4
13.12.2017	64,5	69,1	74,2	75,5	47	34,2
28.12.2017	59,7	77,6	78,2	45	25,6	35
25.1.2018	74	60,7	78,6	60,7	57,7	8,4
16.2.2018	72,4	74,8	73,5	64,3	33,2	41,1
12.4.2018				12,78	19,7	4,9
7.5.2018	66,7	70,5	70,7		7,8	68,3
22.5.2018	57	51,3	56,2	44,1	23,6	61,6
4.6.2018	60,2	53,8	60	49,1	55,7	51
4.7.2018	49,4	54,6	62,5	59,7	56,6	56,1
19.7.2018	32,8	52,8	61,7	38,3	63,8	80,3
3.8.2018	40,7	38,5	42,1	55	22,2	60,9
7.8.2018	35,9	43,2	54,1	48,4	18,3	58,7
13.9.2018	59,3	49,9	57	41,8	14,7	62,1
25.9.2018	77,3	56,2	42	40,9	21,6	69,8
9.10.2018	71,3	58	62,9	66,4	31,4	65,8
14.11.2018	81,3	92,2	107,3	85,3	80,1	96
26.11.2018	97,8	89,4	90,4	94	91,6	100,7
12.12.2018	97,9	97,2	72,4	94,9	77,6	93,7

Liite 2 (2): Kenttämittausten tulokset

Liuennot happi [mg/l]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
1.12.2017	8,12	7,71	7,83	8,77	5,62	9,29
13.12.2017	7,66	8,5	9,13	9,35	5,56	4,2
28.12.2017	7,6	9,87	10,01	5,54	3,23	4,42
25.1.2018	9,53	7,71	10,04	7,71	7,39	1,08
16.2.2018	9,3	9,54	9,42	8,23	4,2	5,36
12.4.2018				1,64	2,57	0,69
7.5.2018	9,3	9,29	9,18		1,08	9,5
22.5.2018	7,51	6,68	7,17	5,59	3,17	8,49
4.6.2018	7,57	6,74	7,41	6,05	7,26	6,72
4.7.2018	5,77	6,42	7,29	6,93	6,98	6,88
19.7.2018	3,7	5,95	6,95	4,35	7,55	9,48
3.8.2018	4,36	4,22	4,59	5,87	2,48	6,9
7.8.2018	3,82	4,64	5,76	5,13	2,02	6,59
13.9.2018	6,26	5,32	6,09	4,5	1,61	6,96
25.9.2018	8,67	6	4,5	4,42	2,38	7,92
9.10.2018	7,87	6,4	6,91	7,45	3,57	7,75
14.11.2018	9,63	11,04	12,76	10,3	9,54	12,02
26.11.2018	11,98	10,95	10,86	11,69	11,24	13,05
12.12.2018	12,12	12,46	8,8	12,22	9,44	12,18
Ilmanpaine [mmHg]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
13.12.2017	732,2	732,3	732,3	732,3	732,5	732,3
28.12.2017	747,8	747,7	747,8	748,2	748,5	747,7
25.1.2018	731,2	731,2	731,3	731,5	731,6	731,3
16.2.2018	763,8	763,9	764	764,2	764,4	763,9
12.4.2018				764,7	764,6	764,7
7.5.2018	762,5	762,9	763		763	762,7
22.5.2018	765,5	765,7	765,7	765,6	765,6	765,5
4.6.2018	744,9	744,7	744,7	744,7	744,8	744,8
4.7.2018	754,2	754,3	754,3	754,3	754,3	754,3
19.7.2018	761,2	761,2	761,2	761,2	761,3	761,2
3.8.2018	755,8	756	755,8	755,8	755,9	755,9
7.8.2018	755,4	755,3	755,3	755,3	755,4	755,3
13.9.2018	748	747,9	747,9	747,8	747,7	748
25.9.2018	755,9	755,8	755,8	756	755,9	755,9
9.10.2018	746,2	746,2	746,3	746,3	746,3	746,2
14.11.2018	761	761,1	761,2	761,2	761,1	761
26.11.2018	752,8	752,9	752,9	753,1	753,1	752,8
12.12.2018	769,9	770,2	770,3	770,5	770,6	769,9

Liite 2 (3): Kenttämittausten tulokset

ORP [mV]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
1.12.2017	155,2	148,6	139,7	140,3	144,6	150,2
13.12.2017	152,2	176,5	168,2	170,6	202,2	120,2
28.12.2017	124,2	108,5	102,3	117,8	124,2	120,5
25.1.2018	87	131	130,2	131	118,8	43,1
16.2.2018	130,7	213,4	212,4	209	254,6	115,5
12.4.2018				153,4	185	209
7.5.2018	178,3	187	173,2		37,5	171,4
22.5.2018	205,6	120,2	116,9	89,1	15,8	51,4
4.6.2018	203,2	192,1	199,8	176,2	102,4	110,3
4.7.2018	212,9	191,4	207,7	205,1	99,5	192,4
19.7.2018	221,3	199,4	213,1	214,1	119,8	196,5
3.8.2018	171,8	155,2	164,1	158,4	85,5	156,8
7.8.2018	178,4	161,5	170,3	164,2	83,5	164
13.9.2018	108,5	91,4	92,3	92,4	73,6	87,2
25.9.2018	126,6	141,2	148,8	146,2	77,7	125
9.10.2018	118,8	126,2	142,6	138,9	100,3	91,2
14.11.2018	81,3	48,6	26,6	34,6	49,7	60,2
26.11.2018	111	83,7	74,8	38,6	62,4	79,8
12.12.2018	112,5	86	81,9	57,4	52,1	87,2
pH	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
1.12.2017	7,34	7,44	7,48	7,08	6,89	7,38
13.12.2017	7,36	7,68	7,66	7,32	7	7,35
28.12.2017	7,6	7,85	7,76	6,97	6,71	7,4
25.1.2018	7,68	7,31	7,88	7,31	7,06	7,31
16.2.2018	7,75	7,9	7,88	7,49	6,88	7,51
12.4.2018				7,07	6,59	7,33
7.5.2018	7,59	7,61	7,43		6,66	7,44
22.5.2018	7,33	7,08	7,21	6,96	6,88	7,36
4.6.2018	7,3	7,25	7,3	7,09	6,92	7,34
4.7.2018	7,12	7,24	7,38	7,15	7,05	7,34
19.7.2018	7,14	7,22	7,25	6,85	7,02	7,42
3.8.2018	7,19	7,16	7,16	7,09	6,52	7,37
7.8.2018	6,99	6,99	7,07	6,79	6,12	7,15
13.9.2018	7,29	7,12	7,06	6,82	6,34	7,34
25.9.2018	7,34	7,14	7	6,88	6,36	7,39
9.10.2018	7,49	7,38	7,42	7,45	6,47	7,5
14.11.2018	7,38	7,54	7,39	7,79	6,53	7,59
26.11.2018	7,44	7,35	7,57	7,51	6,5	7,58
12.12.2018	7,45	7,49	7,48	7,29	6,38	7,6

Liite 2 (4): Kenttämittausten tulokset

Sähkönjohtavuus [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
1.12.2017	16524	17800	16948	19728	20004	15087
13.12.2017	16562	18659	16817	19580	20426	15205
28.12.2017	16608	19036	16930	20254	19674	15196
25.1.2018	16766	20201	17268	20291	19331	15254
16.2.2018	16795	19481	17216	20127	20350	15168
12.4.2018				15080	13312	15473
7.5.2018	6420	15760	15604		4004	6948
22.5.2018	16303	14704	16381	17754	2592	2671
4.6.2018	15885	13905	16225	17400	2510	2471
4.7.2018	15875	13700	16126	16648	2675	2491
19.7.2018	15917	12946	16128	17554	2652	2492
3.8.2018	14930	13271	15395	15867	2670	2457
7.8.2018	15596	13372	16010	16640	3060	2560
13.9.2018	17230	16704	16618	15374	7636	2706
25.9.2018	9931		19225	17469	9913	3151
9.10.2018	18715	18810	19337	15223	10476	3104
14.11.2018	16657	13134	15758	9973	13323	2669
26.11.2018	15688	11931	16333	8662	13457	2647
12.12.2018	15756	10098	16607	7094	14077	2618
Tyhjennetty vesimäärä [l]	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
23.3.2018	71	10	15	63	145	110
12.4.2018				2,4	324	164
7.5.2018					308	207
9.5.2018					272	75
14.5.2018					245	122
17.5.2018					212	60
22.5.2018					142	74
1.6.2018						75
7.8.2018	52	102	45	63	60	40
16.10.2018	63	77	71	65	98	98

Liite 3 (1): Laboratorioanalyysien tulokset jaoteltuna päivämäärän ja lysimetrin mukaan

Alumiini Al (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<0.03	<0.03		<0.03	<0.03	<0.03
14.6.2018	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
10.9.2018	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
10.12.2018	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
Arseeni As (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	0,51	0,66		0,52	0,42	0,48
14.6.2018	0,093	0,35	0,32	0,16	0,17	0,51
10.9.2018	0,059	0,4	0,48	0,46	0,16	0,71
10.12.2018	0,24	0,1	0,29	0,17	0,097	0,3
Barium Ba (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	5,3	6,2		9	7	10,8
14.6.2018	6,3	5	7	60,6	6,6	6,4
10.9.2018	8,2	7,2	8,6	18,7	8,9	37,9
10.12.2018	5,8	3,4	6,1	3,5	6	7,2
Boori B (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	155	94,2		92,3	90,8	119
14.6.2018	51,8	78,7	46,7	30,6	46,3	36,4
10.9.2018	166	193	124	162	114	124
10.12.2018	131	168	93,7	136	64,2	54,6
DOC (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	9,4	10,5		10,5	11,4	9
14.6.2018	0,9	7	7,1	3,8	1,3	5,9
10.9.2018	2,6	5,1	5,8	5,6	1,6	5,2
10.12.2018	4,4	2	3,8	2,8	1,4	3,2
Fluoridi (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<4.0	<4.0		<4.0	<4.0	<4.0
14.6.2018	<1.0	<1.0	<1.0	5,5	<2.0	<1.0
10.9.2018	5,6	<1.0	<1.0	5,9	0,38	2,7
10.12.2018	<1.0	0,32	1,1	0,48	0,61	1,3
Fosfori P (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<0.05	<0.05		<0.05	<0.05	<0.05
14.6.2018	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
10.9.2018	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
10.12.2018	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Kadmium Cd (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	1,4	1,8		1,1	0,63	0,91
14.6.2018	0,048	1,1	0,57	0,19	<0.01	6
10.9.2018	0,054	0,32	0,27	0,24	<0.01	1,8
10.12.2018	0,14	0,076	0,093	0,13	<0.01	0,45

Liite 3 (2): Laboratorioanalyysien tulokset jaoteltuna päivämäärän ja lysimetrin mukaan

Kalium K (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	197	198		181	199	173
14.6.2018	24,8	179	184	76,5	86,6	293
10.9.2018	82,5	222	298	206	102	700
10.12.2018	94,3	147	1340	177	77,1	2300
Kalsium Ca (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	375	372		385	383	355
14.6.2018	529	326	330	185	525	280
10.9.2018	464	409	418	353	587	408
10.12.2018	378	406	391	377	501	418
Kloridi (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	120	170		160	370	220
14.6.2018	0,88	130	440	67	10	870
10.9.2018	3,9	100	760	180	10	1300
10.12.2018	3,5	26	1400	110	21	2100
Koboltti Co (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	86,7	99,9		52,7	13,1	14
14.6.2018	45,4	21,2	9,9	3,8	0,47	37,8
10.9.2018	4,7	10,5	6,1	5,7	0,4	17,9
10.12.2018	387	2,8	1,1	2,4	0,18	2,4
Kromi Cr (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<0.25	<0.25		<0.25	<0.25	<0.25
14.6.2018	<0.05	0,08	0,089	0,082	0,058	0,14
10.9.2018	0,082	0,11	0,11	0,13	0,13	0,16
10.12.2018	0,094	0,13	0,14	0,067	0,072	0,095
Kupari Cu (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	0,66	1,6		1,9	0,69	0,83
14.6.2018	0,48	1,1	0,85	1,4	0,16	2,6
10.9.2018	0,089	0,46	0,6	1,8	0,3	2,3
10.12.2018	6	0,48	0,79	0,5	0,39	0,97
Lämpötila (näytteenottajan mittaama) (°C)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	0,2	0,6		-0,4	0,7	0,6
14.6.2018	4,6	5,2	5,4	6,1	4,9	5,1
10.9.2018	11,1	11,3	11	10,8	11	11
10.12.2018	3,2	4	2,7	3,5	3	3
Lyijy Pb (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<0.1	<0.1		<0.1	<0.1	<0.1
14.6.2018	<0.02	0,051	<0.02	<0.02	<0.02	0,078
10.9.2018	<0.02	0,026	0,026	<0.02	<0.02	0,022
10.12.2018	0,026	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0,024

Liite 3 (3): Laboratorioanalyysien tulokset jaoteltuna päivämäärän ja lysimetrin mukaan

Magnesium Mg (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	5160	5270		5410	3400	4010
14.6.2018	90,2	4160	3770	1550	45,8	2990
10.9.2018	1250	3760	3950	3810	89,7	3330
10.12.2018	3320	1030	1830	1850	75	1110
Mangaani Mn (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	180000	140000		98100	44100	52600
14.6.2018	16900	95100	54700	22200	9050	38100
10.9.2018	60500	87200	51200	53400	11700	34500
10.12.2018	139000	44800	23400	38100	9950	18300
Molybdeeni Mo (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	0,48	0,53		0,65	0,62	1
14.6.2018	<0.05	0,45	0,72	0,97	0,31	0,88
10.9.2018	<0.05	0,29	0,65	0,8	0,29	1,3
10.12.2018	0,055	0,11	0,47	0,26	0,23	0,83
Natrium Na (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	145	192		182	188	163
14.6.2018	2,66	153	162	58	5,39	232
10.9.2018	11	149	194	169	9,98	337
10.12.2018	17,2	46,8	240	89,7	10,8	489
Nikkeli Ni (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	126	139		45,6	17	16,8
14.6.2018	43,2	58	14,5	14,6	2,1	30,3
10.9.2018	6,5	32,8	11,5	18,7	1,8	19,4
10.12.2018	150	6,9	2,6	6	0,89	2,6
pH	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	7,41	7,5		7,82	7,45	7,72
14.6.2018	7,03	7,33	7,4	7,49	7,1	7,43
10.9.2018	6,35	7,29	7,24	7,39	7,58	7,55
10.12.2018	6,42	7,66	7,82	7,7	7,71	7,72
Pii Si (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	4,7	4,9		3,2	3,3	3,4
14.6.2018	3,25	4,18	2,5	3,17	2,25	1,97
10.9.2018	4,65	3,96	3,5	4,09	3,46	3,23
10.12.2018	3,12	3,51	2,37	3,74	2,38	1,99
Rauta Fe (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<0.015	0,03		0,03	0,22	<0.015
14.6.2018	0,029	<0.015	<0.015	0,026	0,098	<0.015
10.9.2018	49,9	0,3	0,074	0,031	<0.015	0,018
10.12.2018	24,4	0,039	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015

Liite 3 (4): Laboratorioanalyysien tulokset jaoteltuna päivämäärän ja lysimetrin mukaan

Rauta Fe²⁺ (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	<0.020	0,05		0,04	0,11	<0.020
14.6.2018	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	0,037	<0.020
10.9.2018	53	0,072	0,027	<0.020	<0.020	<0.020
10.12.2018	29	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020
Red/Ox (mV Ag/AgCl3MKCl)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	45	120		130	190	200
14.6.2018	270	240	230	160	170	200
10.9.2018	-8,1	160	170	180	170	82
10.12.2018	43	150	130	110	110	110
Rikki S (liukoinen) (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	7350	7600		7630	4740	5700
14.6.2018	510	5790	5610	2260	492	4120
10.9.2018	2120	5400	5360	5330	605	4880
10.12.2018	5380	1830	3190	3100	524	2600
Sähkönjohtavuus (mS/m)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	2000	2100		2000	1500	1700
14.6.2018	250	16	16	7,6	250	14
10.9.2018	720	1600	1700	1600	280	1700
10.12.2018	1300	640	1400	950	250	1500
Sinkki Zn (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	11500	12900		4580	2080	2300
14.6.2018	5090	8120	2200	1100	119	2410
10.9.2018	678	2490	1230	1470	107	1400
10.12.2018	31300	995	325	1490	119	491
Strontium Sr (liukoinen) (µg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	1180	1040		1130	848	881
14.6.2018	865	826	830	362	1700	682
10.9.2018	1180	1130	1230	1030	2620	1200
10.12.2018	1150	781	1050	806	2670	1150
TIC (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	105	94,3		67,5	49,8	40,1
14.6.2018	29,5	100	42	83,6	14,3	25,4
10.9.2018	40,8	85,1	53,4	104	23,3	41,5
10.12.2018	22,4	59,7	17,8	97,8	39,9	29,3
TOC (mg/l)	L1RH	L2MO	L3MI	L4KA	L5SE	L6NO
7.3.2018	8,9	10,5		11,3	11,9	9,1
14.6.2018	1,8	7	7,2	3,8	1,2	5,9
10.9.2018	2,6	5,4	6,1	5,8	1,6	5,4
10.12.2018	4,4	2,1	3,9	2,9	1,3	3,2



28.9.2018

Sivu 1/2

SMA Mineral
Juho Kinnunen

Tilauspvm 22.8.2018

Vedenläpäisevyyden määrittäminen

Näytteet

Rikastushickkanäyte lähetettiin laboratorioon tilaajan (SMA Mineral) toimesta. Näyte otettiin vastaan laboratorioon 27.8.2018.

Näytteiden esikäsittely

Ennen testausta näytettä säilytettiin huoneenlämmössä.

Testausmenetelmät

Näytteen rakeisuus on testattu areometrikokeen ja pesuseulonnan avulla. Rakeisuusmäärittäminen on esitetty liitteessä 1 ja maalajina on ilmoitettu rakeisuudeltaan vastaava luonnon maalaji.

Maa-aineksen optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino on määritetty parannetun Proctor-kokeen avulla käyttäen halkaisijaltaan 102 mm muottia (yli 16 mm rakeet poistettiin). Parannetun Proctor-kokeen tulos liitteessä 2.

Vedenläpäisevyydet määritettiin joustavascinäisellä menetelmällä kolmiaksisiaalisellissa. Vedenläpäisynäyte sullottiin haluttuun tiivyyteen alle 16 mm materiaalista käyttämällä Proctor-vasaraa. Näyte sullottiin viidessä yhtä suuressa kerroksessa käyttäen apuna sullontapalikkaa. Optimivesipitoisuus saavutettiin kuivaamalla näyte ja lisäämällä tarvittava vesimäärä näytteeseen. Kokeen aikana tehokas jännitys oli noin 70 kPa ja sellipaine noin 150 kPa. Hydraulista gradienttia nostettiin kokeen aikana portaittain. Vesipitoisuus ennen kokeen alkua on määritetty kuivattamalla osanäyte ja kokeen

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (2): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset



28.9.2018

Sivu 2/2

jälkeinen vesipitoisuus on määritetty kuivattamalla vedenläpäisynäyte uunissa vakiolämmössä 105 °C.

Tulokset

Näyte	Maalaji	Max kuivatila- vuuspaino	Optimivesipitoisuus	k-Arvo Ka	k-Arvo Med
Rikastushiekka	siHk	24.5	8.2	$3.59 \cdot 10^{-8}$	$3.58 \cdot 10^{-8}$

Vedenläpäisykokeen tulos on esitetty liitteessä 3. Vedenläpäisykappaleen tiiveys oli 94 % parannetusta Proctor-tiiviudesta (yli 16 mm rakeet poistettiin eikä niitä ole huomioitu). Kokeessa käytettiin hydraulisia gradientteja 10, 12 ja 13.

Koe tehtiin 24.-28.9.2018 välisenä aikana.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testauselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jari Turunen
GEO-laborantti, Geologi

Liitteet

Liite 1. Rakeisuustutkimuksen tulos

Liite 2. Proctor-kokeen tulos

Liite 3. Vedenläpäisykokeen tulos

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (3): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset

Liite 1



RAKEISUUSTUTKIMUS

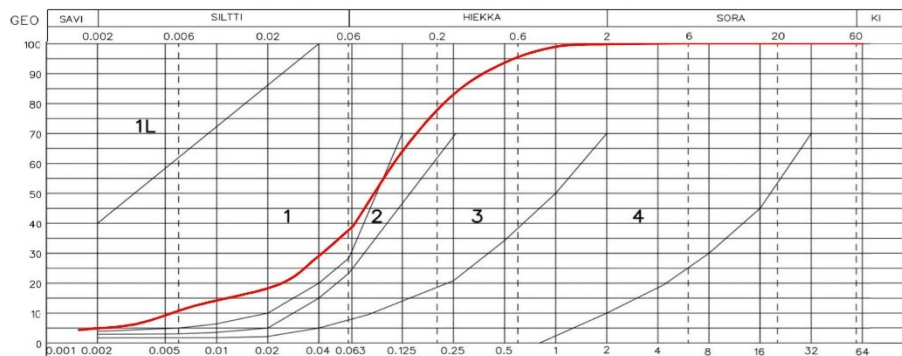
X	
Y	
Z	

Projekti	Laboratoriotutkimukset
Tilaaaja	SMA Mineral
Näyte	Rikastushiekka
Näytteenottaja/pvm	Tilaaaja

Työnumero	2018_331
Yhteyshenkilö	Juho Kinnunen
Paalu	-
Näytteenotin	

Kuvaajatunnus					
Näyte	Rikastushiekka				
Syvyys [m]	-				
Routivuus GEO	routiva				
Menetelmät (*)	2,3,4				
Turpeen maatuneisuus					
Vesipitoisuus %	15.0				
Humuspitoisuus %					
Märkätilavuuspaino					
Kivisyys > 200 mm					
Kivisyys 63 - 200 mm					
Leikkauslujuus					
Sensitiivisyys					
Hienousluku %					
d ₅₀	0.081				
Maalaji	siHk				

(*) 1. SFS-EN 933-1 (kuivaseulonta) 2. SFS-EN 933-1 (pesuseulonta) 3. PANK-2103 (hydrometri) 4. SFS-EN 1097-5 (vesipitoisuus)
5. SFS-EN 1744-1 (humuspitoisuus) 6. CEN ISO/TS 17892-6:fi (kartiokoe) 7. Von Post (turpeen maatuneisuusaste)



	0.002	0.006	0.02	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	22.4	31.5	64
Näyte 1	5.0	10.5	18.2	39.0	64.4	83.2	93.7	98.9	99.7	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

*Laskettu läpäisyprosentti

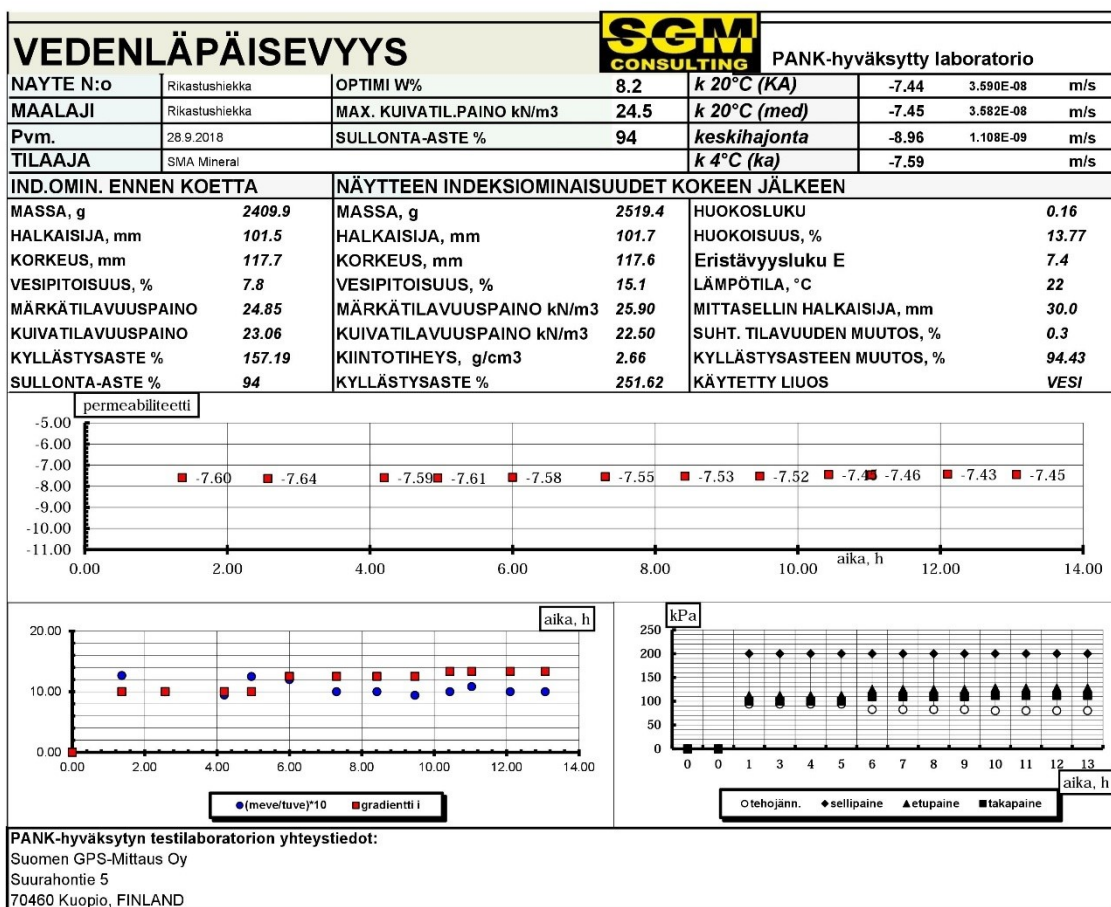
Huomioitavaa

Näyte 1	-
	-
	-
	-
	-

Jari Turunen
28.9.2018

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahentie 5, 70460 Kuopio
PANK-hyväksytty laboratorio

Liite 4 (4): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset





16.8.2018

Sivu 1/2

SMA Mineral
Juho Kinnunen

Tilauspvm 22.8.2018

Vedenläpäisevyyden määrittäminen

Näytteet

Kalsiittinäyte lähetettiin laboratorioon tilaajan (SMA Mineral) toimesta. Näyte kalsiitista otettiin vastaan laboratorioon 27.8.2018.

Näytteiden esikäsittely

Ennen testausta näytettä säilytettiin huoneenlämmössä.

Testausmenetelmät

Näytteen rakeisuus on testattu areometrikokeen ja pesuseulonnan avulla. Rakeisuusmäärittäminen on esitetty liitteessä 1 ja maalajina on ilmoitettu rakeisuudeltaan vastaava luonnon maalaji.

Maa-aineksen optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino on määritetty parannetun Proctor-kokeen avulla käyttäen halkaisijaltaan 102 mm muottia (yli 16 mm rakeet poistettiin). Parannetun Proctor-kokeen tulos liitteessä 2.

Vedenläpäisevyydet määritettiin joustavaseinäisellä menetelmällä kolmiakselisissa. Vedenläpäisynäyte sullottiin haluttuun tiivyyteen alle 16 mm materiaalista käyttämällä Proctor-vasaraa. Näyte sullottiin viidessä yhtä suuressa kerroksessa käyttäen apuna sullontapalikkaa. Optimivesipitoisuus saavutettiin kuivaamalla näyte ja lisäämällä tarvittava vesimäärä näytteeseen. Kokeen aikana tehokas jännitys oli noin 70 kPa ja sellipaine noin 150 kPa. Hydraulista gradienttia nostettiin kokeen aikana portaittain. Vesipitoisuus ennen kokeen alkua on määritetty kuivattamalla osanäyte ja kokeen

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (6): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset



16.8.2018

Sivu 2/2

jälkeinen vesipitoisuus on määritetty kuivattamalla vedenläpäisynäyte uunissa vakiolämmössä 105 °C.

Tulokset

Näyte	Maalaji	Max kuivatila- vuuspaino	Optimivesipitoisuus	k-Arvo Ka	k-Arvo Med
Moreeni	HkMr	21.6 21.8 yli 16mm ki- vet huomioituna	6.1 5.7 yli 16 mm kivet huomioituna	$1.94 \cdot 10^{-7}$	$1.96 \cdot 10^{-7}$

Vedenläpäisykokeen tulos on esitetty liitteessä 3. Vedenläpäisykappaleen tiiveys oli 95 % parannetusta Proctor-tiivyydestä (yli 16 mm rakeet poistettiin eikä niitä ole huomioitu). Kokeessa käytettiin hydraulisia gradientteja 4,5 ja 6.

Koe tehtiin 20.-21.9.2018 välisenä aikana.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jari Turunen
GEO-laborantti, Geologi

Liitteet

Liite 1. Rakeisuustutkimuksen tulos

Liite 2. Proctor-kokeen tulos

Liite 3. Vedenläpäisykokeen tulos

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (7): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset

Liite 1



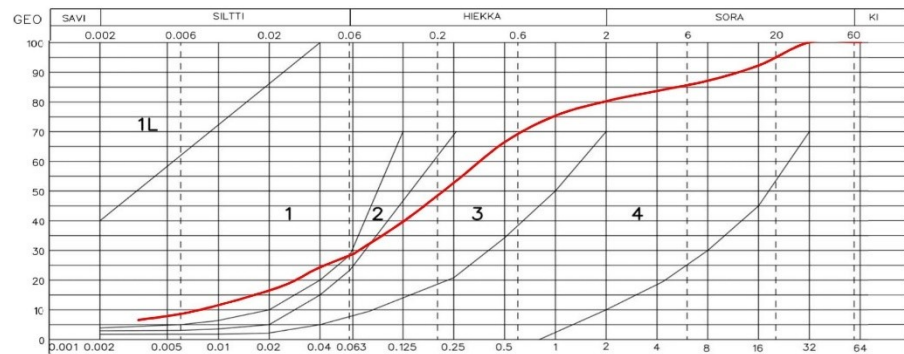
RAKEISUUSTUTKIMUS

Projekti	Laboratoriotutkimukset
Tilaja	SMA Mineral
Näyte	Moreeni
Näytteenottaja/pvm	Tilaja

X	
Y	
Z	
Työnumero	2018_331
Yhteyshenkilö	Juho Kinnunen
Paalu	-
Näytteenotin	

Kuvaajatunnus	
Näyte	Moreeni
Syvyys [m]	-
Routivuus GEO	routiva
Menetelmät (*)	2,3,4
Turpeen maatuneisuus	
Vesipitoisuus %	5,9
Humuspitoisuus %	
Märkätilavuuspaino	
Kivisyys > 200 mm	
Kivisyys 63 - 200 mm	
Leikkauslujuus	
Sensitiivisyys	
Hienousluku %	
d ₅₀	0.157
Maalaji	HkMr

(*) 1. SFS-EN 933-1 (kuivaseulonta) 2. SFS-EN 933-1 (pesuseulonta) 3. PANK-2103 (hydrometri) 4. SFS-EN 1097-5 (vesipitoisuus)
5. SFS-EN 1744-1 (humuspitoisuus) 6. CEN ISO/TS 17892-6-fi (kartiooke) 7. Von Post (turpeen maatuneisuusaste)



	0.002	0.006	0.02	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	22.4	31.5	64
Näyte 1	8.7	16.3	28.9	39.9	53.0	66.6	75.4	80.2	83.6	87.1	92.3	95.4	100.0	100.0	100.0

*Laskettu läpäisyprosentti

Huomioitavaa

Näyte 1	-
	-
	-
	-
	-

Jari Turunen
21.9.2018

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahentie 5, 70460 Kuopio
PANK-hyväksytty laboratorio

RAPORTTI - Parannettu Proctor-ko



PANK-hyväksytty laboratorio

Tilaaaja	SMA Mineral Oy							
Näytteen ottopaikka	-							
Näytteenottaja / pvm	Tilaaaja							
Näyte nro	-							
Näytesyvyys	-							
Maalaji	Moreeni							
Sullottu näyte	1	2	3					
Näytteen vesipitoisuus	5.0	6.1	7.5					
Näytteen märkätilavuuspaino, γ (kN/m ³)	22.2	22.9	22.6					
Näytteen kuivatilavuuspaino, γ_d (kN/m ³)	21.2	21.6	21.0					

Tulokset

Näytteen kuivatilavuuspaino

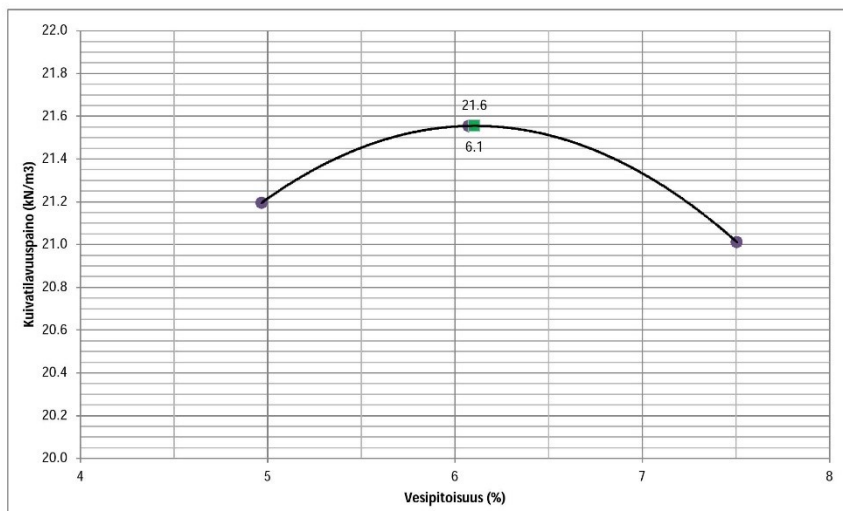
Kuivatilavuuspaino yli 16mm kivet huomioituna

$$\gamma_{dmax} = 21.6$$

$$\gamma_{dmax, korj} = 21.8$$

$$w_{opt} = 6.1$$

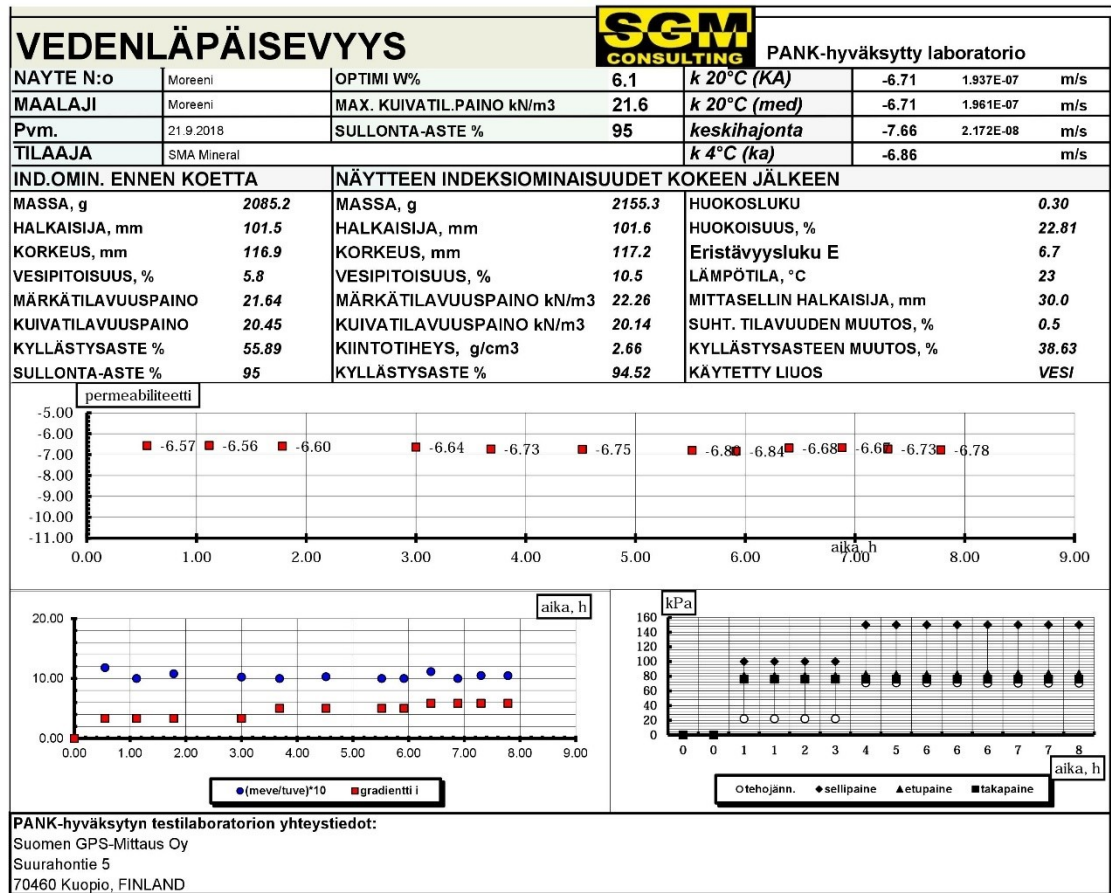
$$w_{opt, korj} = 5.7$$



PANK-hyväksytyn testilaboratorion yhteystiedot:

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahontie 5
70460 Kuopio
FINLAND

Liite 4 (9): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset





24.9.2018

Sivu 1/2

SMA Mineral
Juho Kinnunen

Tilauspvm 22.8.2018

Vedenläpäisevyyden määrittäminen

Näytteet

Näyte lähetettiin laboratorioon tilaajan (SMA Mineral) toimesta. Näyte kalkmixinasta otettiin vastaan laboratorioon 27.8.2018.

Näytteiden esikäsittely

Ennen testausta näytettä säilytettiin huoneenlämmössä.

Testausmenetelmät

Näytteen rakeisuus on testattu areometrikokeen ja pesuseulonnan avulla. Rakeisuusmäärittämisen tulos on esitetty liitteessä 1 ja maalajina on ilmoitettu rakeisuudeltaan vastaava luonnon maalaji.

Maa-aineksen optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino on määritetty parannetun Proctor-kokeen avulla käyttäen halkaisijaltaan 102 mm muottia (yli 16 mm rakeet poistettiin). Parannetun Proctor-kokeen tulos liitteessä 2.

Vedenläpäisevyydet määritettiin joustavaseinällä menetelmällä kolmiakselisissa. Vedenläpäisynäyte sullottiin haluttuun tiiviyteen alle 16 mm materiaalista käyttämällä Proctor-vasaraa. Näyte sullottiin viidessä yhtä suuressa kerroksessa käyttäen apuna sullontapalikkaa. Optimivesipitoisuus saavutettiin kuivaamalla näyte ja lisäämällä tarvittava vesimäärä näytteeseen. Kokeen aikana tehokas jännitys oli noin 70 kPa ja sellipaine noin 150 kPa. Hydraulista gradienttia nostettiin kokeen aikana portaittain. Vesipitoisuus ennen kokeen alkua on määritetty kuivattamalla osanäyte ja kokeen

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (11): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset



24.9.2018

Sivu 2/2

jälkeinen vesipitoisuus on määritetty kuivattamalla vedenläpäisynäyte uunissa vakiolämmössä 105 °C.

Tulokset

Näyte	Vastaava luonnon maalaji	Max kuivatila- vuuspaino	Optimivesipitoisuus	k-Arvo Ka	k-Arvo Med
Kalkmix mild	siHkMr	21.4	7.8	$3.77 \cdot 10^{-7}$	$4.23 \cdot 10^{-7}$

Vedenläpäisykokeen tulos on esitetty liitteessä 3. Vedenläpäisykappaleen tiiveys oli 92 % parannetusta Proctor-tiivyydestä (yli 16 mm rakeet poistettiin eikä niitä ole huomioitu). Kokeessa käytettiin hydraulisia gradientteja 4,5 ja 6.

Koe tehtiin 21.-24.9.2018 välisenä aikana.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testauselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jari Turunen
GEO-laborantti, Geologi

Liitteet

Liite 1. Rakeisuustutkimuksen tulos

Liite 2. Proctor-kokeen tulos

Liite 3. Vedenläpäisykokeen tulos

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (12): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset

Liite 1



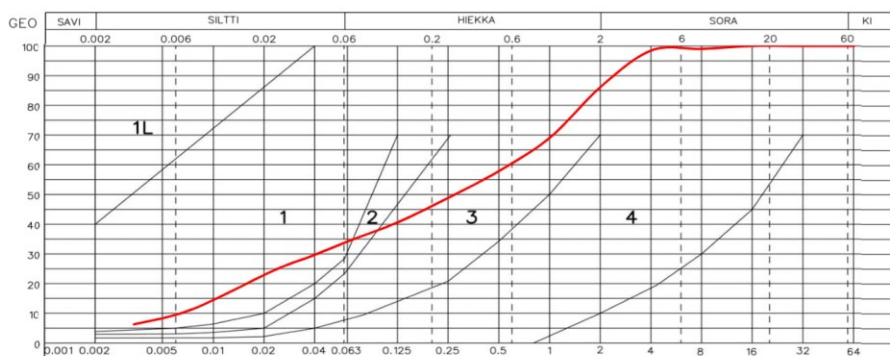
RAKEISUUSTUTKIMUS

Projekti Laboratoriotutkimukset
Tilaja SMA Mineral
Näyte Kalkmix mild
Näytteenottaja/pvm Tilaja

X
Y
Z
Työnumero 2018_331
Yhteyshenkilö Juho Kinnunen
Paalu
Näytteenotin

Kuvaajatunnus				
Näyte	Kalkmix mild			
Syvyys [m]	-			
Routivuus GEO	routiva			
Menetelmät (*)	2,3,4			
Turpeen maatunaisuus				
Vesipitoisuus %	7.9			
Humuspitoisuus %				
Märkätilavuuspaino				
Kivisyys > 200 mm				
Kivisyys 63 - 200 mm				
Leikkauslujuus				
Sensitiivisyys				
Hienousluku %				
d ₅₀	0.254			
Maalaji	siHkMr			

(*) 1. SFS-EN 933-1 (kuivaseulonta) 2. SFS-EN 933-1 (pesuseulonta) 3. PANK-2103 (hydrometri) 4. SFS-EN 1097-5 (vesipitoisuus)
5. SFS-EN 1744-1 (humuspitoisuus) 6. CEN ISO/TS 17892-6:fi (karttiokoe) 7. Von Post (turpeen maatunaisuusaste)



	0.002	0.006	0.02	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	22.4	31.5	64
Näyte 1	9.8	22.4	34.4	40.9	49.1	58.2	69.3	86.4	98.5	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

*Laskettu läpäisyprosentti

Huomioitavaa

Näyte 1	-
	-
	-
	-
	-

Jari Turunen
24.9.2018

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahentie 5, 70460 Kuopio
PANK-hyväksytty laboratorio

RAPORTTI - Parannettu Proctor-koe



PANK-hyväksytty laboratorio

Tilaaaja	SMA Mineral							
Näytteen ottopaikka	-							
Näytteenottaja / pvm	Tilaaaja							
Näyte nro	-							
Näytesyvyys	-							
Maalaji	Kalkmix mild							
Sullottu näyte	1	2	3	4				
Näytteen vesipitoisuus	5.2	6.5	7.5	8.4				
Näytteen märkätilavuuspaino, γ (kN/m ³)	21.7	22.3	22.9	23.0				
Näytteen kuivatilavuuspaino, γ_d (kN/m ³)	20.6	20.9	21.3	21.2				

Tulokset

Näytteen kuivatilavuuspaino

Kuivatilavuuspaino yli 16mm kivet huomioituna

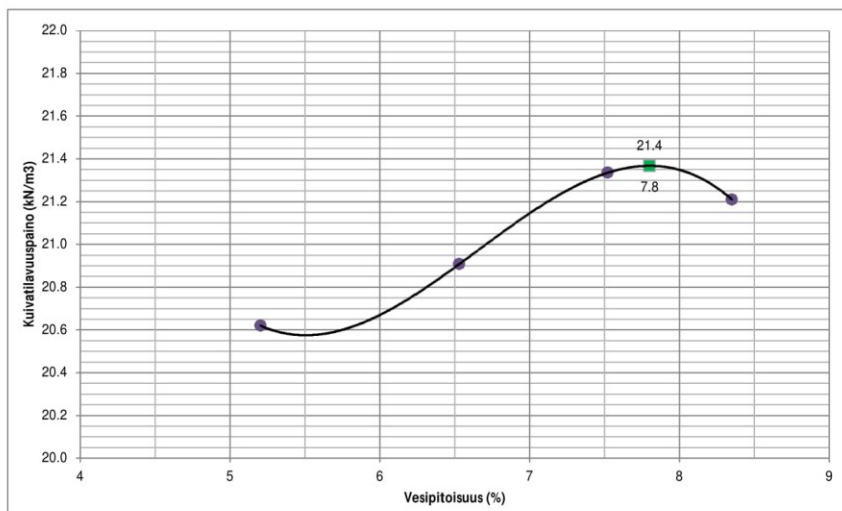
$$\gamma_{dmax} = 21.4$$

$$\gamma_{dmax, korj} = -$$

El yli 16mm kiviä

$$w_{opt} = 7.8$$

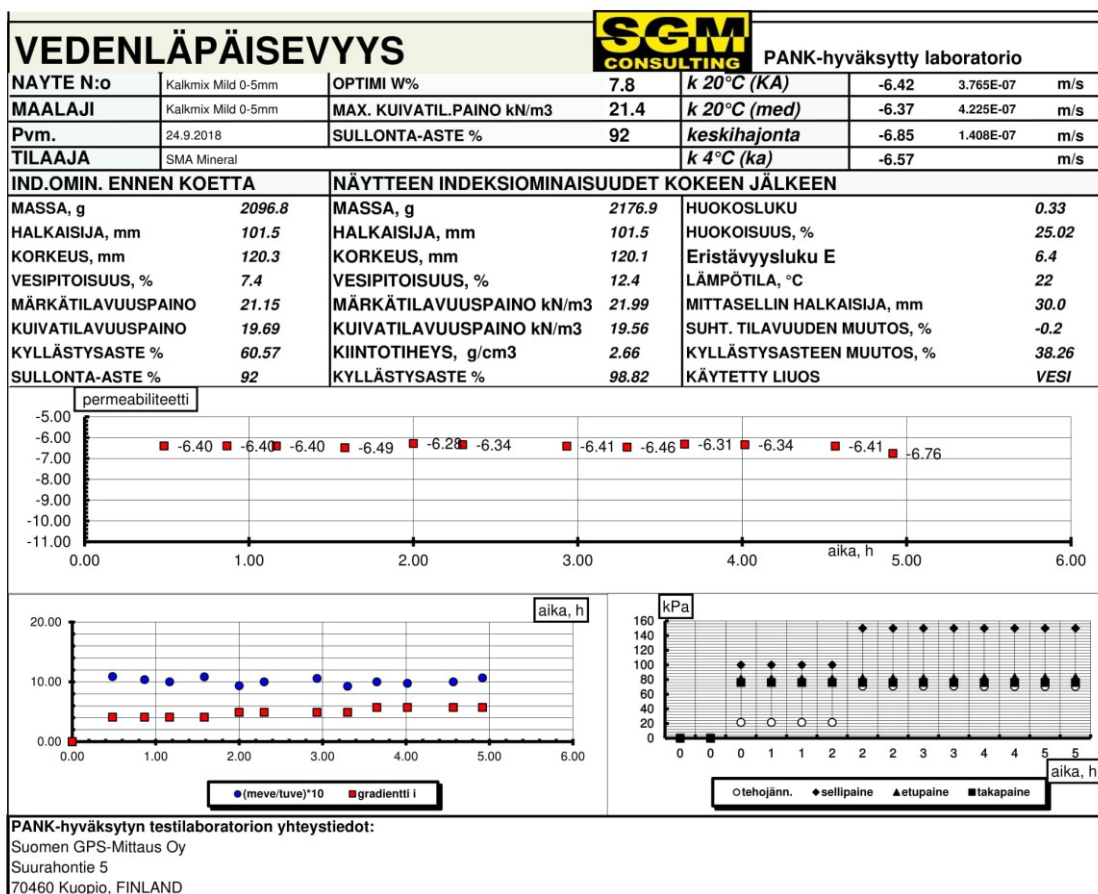
$$w_{opt, korj} = -$$



PANK-hyväksytyn testilaboratorion yhteystiedot:

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahontie 5
70460 Kuopio
FINLAND

Liite 4 (14): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset





24.9.2018

Sivu 1/2

SMA Mineral
Juho Kinnunen

Tilauspvm 22.8.2018

Vedenläpäisevyyden määrittäminen

Näytteet

Kalsiittinäyte lähetettiin laboratorioon tilaajan (SMA Mineral) toimesta. Näyte kalsiitista otettiin vastaan laboratorioon 27.8.2018.

Näytteiden esikäsittely

Ennen testausta näytettä säilytettiin huoneenlämmössä.

Testausmenetelmät

Näytteen rakeisuus on testattu areometrikokeen ja pesuseulonnan avulla. Rakeisuusmäärittämisen tulos on esitetty liitteessä 1 ja maalajina on ilmoitettu rakeisuudeltaan vastaava luonnon maalaji.

Maa-aineksen optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino on määritetty parannetun Proctor-kokeen avulla käyttäen halkaisijaltaan 102 mm muottia (yli 16 mm rakeet poistettiin). Parannetun Proctor-kokeen tulos liitteessä 2.

Vedenläpäisevyydet määritettiin joustavaseinäisellä menetelmällä kolmiakselisissa. Vedenläpäisynäyte sullottiin haluttuun tiiviyteen alle 16 mm materiaalista käyttämällä Proctor-vasaraa. Näyte sullottiin viidessä yhtä suuressa kerroksessa käyttäen apuna sullontapalikkaa. Optimivesipitoisuus saavutettiin kuivaamalla näyte ja lisäämällä tarvittava vesimäärä näytteeseen. Kokeen aikana tehokas jännitys oli noin 70 kPa ja sellipaine noin 150 kPa. Hydraulista gradienttia nostettiin kokeen aikana portaittain. Vesipitoisuus ennen kokeen alkua on määritetty kuivattamalla osanäyte ja kokeen

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (16): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset



24.9.2018

Sivu 2/2

jälkeinen vesipitoisuus on määritetty kuivattamalla vedenläpäisynäyte uunissa vakio­lämmössä 105 °C.

Tulokset

Näyte	Vastaava luonnon maalaji	Max kuivatila- vuuspaino	Optimivesipitoisuus	k-Arvo Ka	k-Arvo Med
Kalsiitti	HkMr	22.3	5.4	$3.79 \cdot 10^{-7}$	$3.97 \cdot 10^{-7}$

Vedenläpäisykokeen tulos on esitetty liitteessä 3. Vedenläpäisykappaleen tiiveys oli 92 % paranne-
tusta Proctor-tiivyydestä (yli 16 mm rakeet poistettiin eikä niitä ole huomioitu). Kokeessa käytettiin
hydraulisia gradientteja 5,6 ja 7.

Koe tehtiin 20.-21.9.2018 välisenä aikana.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testauselostuksen saa kopioida ainoastaan koko-
naisuudessaan.

Jari Turunen
GEO-laborantti, Geologi

Liitteet

Liite 1. Rakeisuustutkimuksen tulos

Liite 2. Proctor-kokeen tulos

Liite 3. Vedenläpäisykokeen tulos

SUOMEN GPS-MITTAUS OY

SUURAHONTIE 5
70460 KUOPIO

P. 0400 675 621
Y-TUNNUS 0961185-2

SGMCONSULTING.FI
ETUNIMI.SUKUNIMI@SGMCONSULTING.FI

Liite 4 (17): Materiaaleille teetettyjen geoteknisten testien tulokset

Liite 1



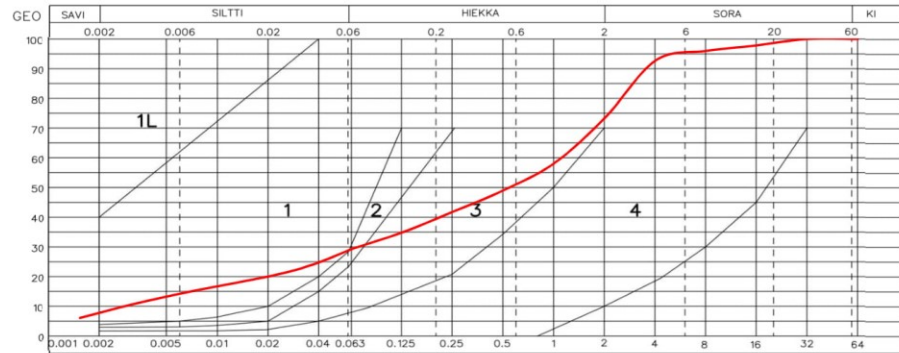
RAKEISUUSTUTKIMUS

Projekti	Laboratoriotutkimukset
Tilaja	SMA Mineral
Näyte	Kalsiitti 0-5mm
Näytteenottaja/pvm	Tilaja

X	
Y	
Z	
Työnumero	2018_331
Yhteyshenkilö	Juho Kinnunen
Paalu	-
Näytteenotin	

Kuvaajatunnus				
Näyte	Kalsiitti			
Syvyys [m]	-			
Routivuus GEO	routiva			
Menetelmät (*)	2,3,4			
Turpeen maatuneisuus				
Vesipitoisuus %	6.4			
Humuspitoisuus %				
Märkätilavuuspaino				
Kivisyys > 200 mm				
Kivisyys 63 - 200 mm				
Leikkauslujuus				
Sensitiivisyys				
Hienousluku %				
d ₅₀	0.508			
Maalaji	HkMr			

(*) 1. SFS-EN 933-1 (kuivaseulonta) 2. SFS-EN 933-1 (pesuseulonta) 3. PANK-2103 (hydrometri) 4. SFS-EN 1097-5 (vesipitoisuus)
5. SFS-EN 1744-1 (humuspitoisuus) 6. CEN ISO/TS 17892-6:fi (karttiokoe) 7. Von Post (turpeen maatuneisuusaste)



	0.002	0.006	0.02	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	22.4	31.5	64
Näyte 1	7.7	14.1	20.0	29.5	35.0	42.0	49.2	58.3	73.5	92.8	96.0	97.9	98.7	100.0	100.0

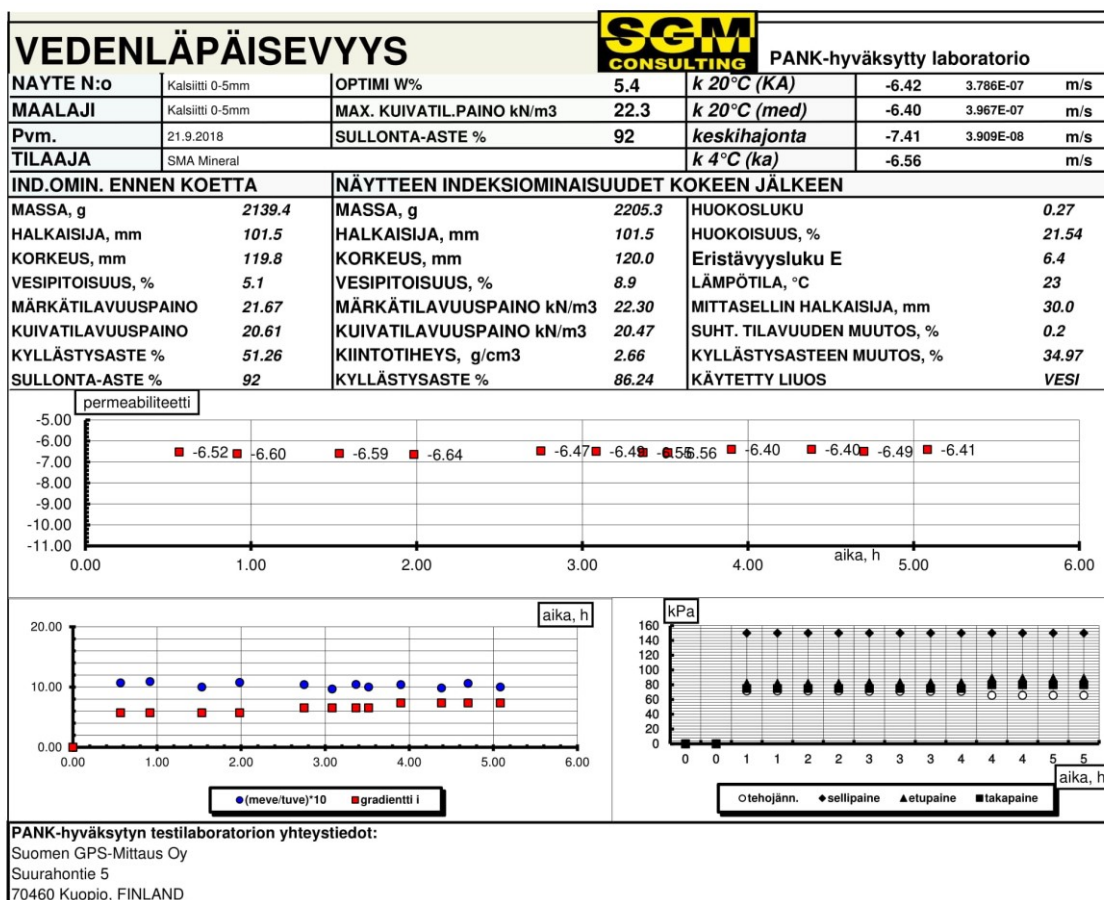
*Laskettu läpäisyprosentti

Huomioitavaa

Näyte 1	-
	-
	-
	-
	-

Jari Turunen
24.9.2018

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahentie 5, 70460 Kuopio
PANK-hyväksytty laboratorio



RAPORTTI - Parannettu Proctor-koe



PANK-hyväksytty laboratorio

Tilaaaja	SMA Mineral							
Näytteen ottopaikka	-							
Näytteenottaja / pvm	Tilaaaja							
Näyte nro	-							
Näytesyvyys	-							
Maalaji	Kalsiitti 0-5mm							
Sullottu näyte	1	2	3	4	5			
Näytteen vesipitoisuus	3.7	6.2	7.5	5.3	7.0			
Näytteen märkätilavuuspaino, γ (kN/m ³)	22.4	23.5	23.3	23.5	23.5			
Näytteen kuivatilavuuspaino, γ_d (kN/m ³)	21.6	22.2	21.7	22.3	22.0			

Tulokset

Näytteen kuivatilavuuspaino

Kuivatilavuuspaino yli 16mm kivet huomioituna

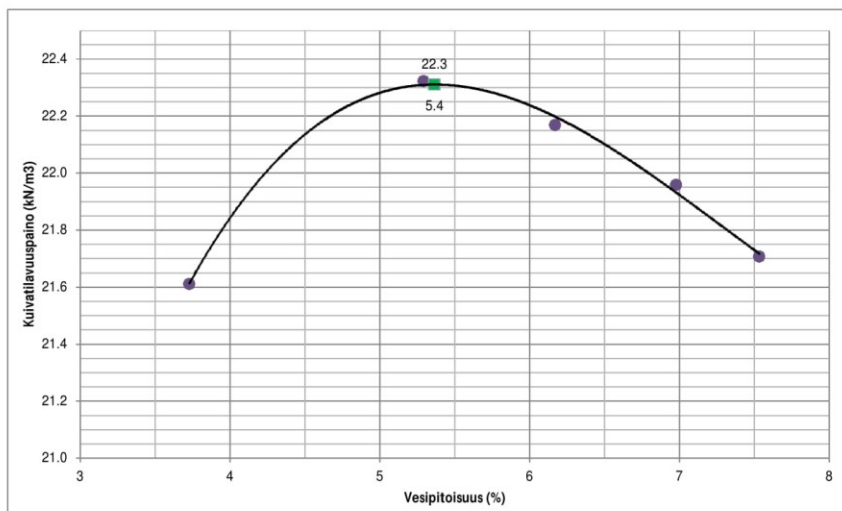
$$\gamma_{dmax} = 22.3$$

$$\gamma_{dmax, korj} = -$$

EI yli 16mm kiviä

$$w_{opt} = 5.4$$

$$w_{opt, korj} = -$$



PANK-hyväksytyn testilaboratorion yhteystiedot:

Suomen GPS-Mittaus Oy
Suurahontie 5
70460 Kuopio
FINLAND

Liite 5 (1): Materiaaleille teetettyjen ABA-testien tulokset

Suorite	810L * (Kuopio)	811L * (Kuopio)	814G (Kuopio)	816L (Kuopio)	816L (Kuopio)	827T (Kuopio)	827T (Kuopio)	827T (Kuopio)
Suoritteen kuvaus	Rikin määräitys rik kianalysaattorilla	Hiilen määräitys hii lianalysaattorilla	Kosteuden tai kui va-aineen määrit ys gravimetrisesti	C karb ja C ei kar b määräitys hiilian alysaattorilla	C karb ja C ei kar b määräitys hiilian alysaattorilla	ABA-testi	ABA-testi	ABA-testi
Parametri	S *	C *	Kosteus	C carb	C non carb	AP	NP	NPR
Määritysraja	0,01	0,05	0,1	0,05	0,05	0,3		
Asiakkaan näytetunnus	%	%	%	%	%	kg CaCO ₃ /t	kg CaCO ₃ /t	
Kalkmix Normal, Tuore	0,04	3,2	1,7	3,17	<0,05	1,2	1176,7	976
Kalkmix Normal, Tuore (2)	0,04	3,24	1,6	3,19	<0,05	1,3	1183,9	898
Kalkmix Normal, Vanha	0,08	5,33	0,5	5,28	<0,05	2,6	1089	419
Kalkmix Mild 0-5 mm	0,06	11,5	0,1	11,4	0,15	2	913,8	469
Kalsiitti 0-5 mm	0,05	11,4	0,1	11,3	0,1	1,7	938,3	548
Rikastushiekka	28,3	0,21	1,8	0,18	<0,05	883	12,9	0,01